

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE MICROESTRUTURAS
POROSAS ATRAVÉS DO GRAFO DA LINHA MEDIANA 2D E
OBTENÇÃO DA LINHA MEDIANA 3D**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

AURO CÂNDIDO MARCOLAN

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 1999.

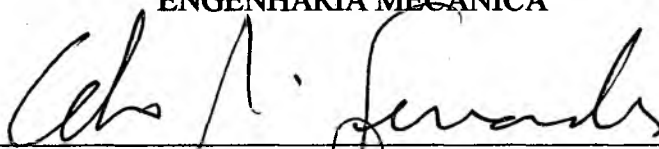
**CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE MICROESTRUTURAS POROSAS
ATRAVÉS DO GRAFO DA LINHA MEDIANA 2D E OBTENÇÃO DA LINHA
MEDIANA 3D**

Auro Cândido Marcolan

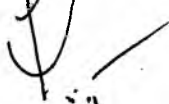
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

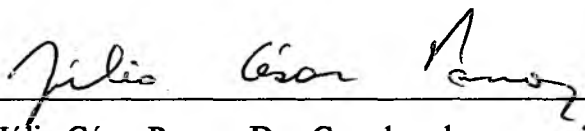
**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA
FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**



Prof. Celso Peres Fernandes, Dr.Eng. - Orientador



Prof. Paulo César Philippi, Dr. Ing. - Co-orientador



Prof. Júlio César Passos, Dr. - Coordenador

BANCA EXAMINADORA



Prof. Antônio Fábio Carvalho da Silva, Dr.Eng. - Presidente



Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr.



Prof. Daniel Santana de Freitas, Dr.Eng.

*"É divina a graça fazer o bem. É graça também persistir, mas
a maior graça é jamais desistir." (D. Helder Câmara)*

À Siomara,

pelo amor, carinho e dedicação.

A Auro Jr. e João Antônio,

fonte inesgotável de alegria e motivação.

*Aos meus pais Roberto e Dorilde,
pelo graça da vida, formação e carinho.*

*Aos meus irmãos Laudelino e Celso
e as minhas irmãs Verônica e Diane,
pela graça de sermos uma família.*

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Celso Peres Fernandes pela competente orientação e condução desse trabalho e, também, pelo privilégio de sua amizade.
- Ao Professor Paulo César Philippi pela oportunidade de conviver com uma pessoa de excepcional conhecimento científico, pela sua amizade e apoio. A sua participação efetiva foi fundamental para o êxito desse trabalho.
- Ao Professor José Antônio Bellini da Cunha Neto por ter participado desta banca examinadora e pelas valiosas discussões que muito contribuíram para este trabalho. Agradeço ainda pelo seu convívio e simpatia.
- Ao Professores Antônio Fábio Carvalho da Silva e Daniel Santana de Freitas por terem participado desta banca, propiciando um debate bastante profícuo.
- Aos colegas Marcos Cabral Damiani e Victor Apocalypse Rodrigues, pela colaboração na parte computacional, principalmente no aprendizado da linguagem C++ e na elaboração do programa, pelo imprescindível apoio e amizade.
- Aos companheiros Aldomar Pedrini, André Duarte Bueno e Liang Zhirong pela convivência fraterna que proporcionaram e pela imprescindível amizade.

- A todos colegas do LMPT/ EMC/UFSC (período 1997/1998), especialmente aos colegas Luis Carlos Pereira Vargas, João Liota Fujihara, Luis Orlando Emerich dos Santos pela convivência e amizade.
- A todos os simpáticos amigos do LMPT: Anastácio, Vilain, Hoffmann, Brasiliense, Nathan, Matsuo e Walter.
- A todos os amigos, próximos ou não, pelo apoio e colaboração.
- À UPF e à CAPES/PICDT pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

Notações e convenções.....	I
Lista de figuras.....	V
Lista de tabelas.....	XV
Resumo.....	XVI
Abstract.....	XVII
Capítulo I – Introdução.....	2
1.1- Problemas envolvendo meios porosos.....	2
1.2- Metodologia para caracterização dos meios porosos.....	3
1.3- Objetivos.....	4
Capítulo II - Análise de imagens de microestruturas porosas.....	7
2.1- Imagens digitais.....	7
2.2- Imagens binárias.....	9
2.3- Parâmetros associados à geometria de imagens binárias.....	10

2.4- Modelos de estruturas porosas.....	14
2.5- Permeabilidade.....	17
Capítulo III – Morfologia Matemática.....	20
3.1- Operações de erosão e dilatação.....	20
3.2- Granulometria e operação de abertura.....	24
3.3- Fundamentos de geometria discreta- métricas Z^2	25
3.4- Elementos estruturantes no espaço discreto com métrica $d_{3,4}$	33
3.5- Interpretação da distribuição de poros obtida com a operação de abertura	37
Capítulo IV – Linha mediana 2D.....	39
4.1- Eixo mediano.....	40
4.2- Extração da linha mediana.....	44
4.3- Afnamento da linha mediana.....	49
Capítulo V – Distribuição de poros - grafo da linha mediana 2D.....	51
5.1- Caracterização das bolas.....	52
5.2- Rotulação dos grupos.....	53
5.3- Caracterização dos grupos-sítios e grupos-ligações.....	54
5.4- Caracterização dos objetos-sítios e objetos-ligações.....	55
5.5- Linha limite e pintura dos sítios e ligações.....	57
5.6- Determinação dos diâmetros dos sítios e ligações.....	58
5.7- Avaliação de imagens	60
Capítulo VI – Linha mediana 3D.....	70
6.1- Espaço discreto tridimensional - Métrica $d_{3,4,5}$	71

6.2- Determinação dos centros máximos.....	74
6.3- Determinação dos voxels-celas.....	74
6.4- Determinação da sequência de células elementares.....	77
6.5- Conectividade e número de Euler.....	78
6.6- Formas básicas com a superfície mediana e linha mediana 3D.....	80
 Capítulo VII – Aplicações em imagens de rochas reservatório.....	84
7.1- Programa do grafo da linha mediana 2D.....	84
7.2- Imagens de microestruturas porosas.....	86
7.3- Imagens reconstruídas 3D.....	97
 Capítulo VIII – Conclusões e sugestões.....	102
8.1- Conclusões.....	102
8.2- Sugestões para trabalhos futuros.....	104
 Bibliografia.....	106
 Anexos.....	110
 Anexo I – Fluxogramas do programa do grafo da linha mediana 2D.....	112
 Anexo II – Fluxograma do programa da linha mediana 3D.....	121

NOTAÇÕES E CONVENÇÕES

A	Área da seção, normal à amostra, L^2 , m^2
B_x	Elemento estruturante.
$C(u)$	Autocorrelação
$C_8(P)$	Número de conectividade
$D^A(B_x)$	Dilatado de A por B_x
d_E	Distância Euclidiana, L , m
d_H	Diâmetro hidráulico, L , m
d_{3-4}	Métrica 3-4
d_{3-4-5}	Métrica 3-4-5
d_4	Métrica de quarteirão.

d_{5-7-11}	Métrica 5-7-11
d_8	Métrica tabuleiro de xadrez.
$E^A(B_x)$	Erodido de A por B_x
$F(d \leq D)$	Fração de poros de tamanhos d menores ou iguais a D
$f(P)$	Função transformada da função $l(x,y)$
f_i	Frequência de sítios desta mesma classe i
$F(r_i)$	Distribuição acumulada de poros
g_L	Condutância do fluido em um ponto ligação, $L^4/t/m$, $m^4/s/kg$
g_i	Condutância do fluido em um nó, $L^4/t/m$, $m^4/s/kg$
$grad(n_k)$	Gradiente
H_i	Número de poros da classe i
$I_{bin}(i,j)$	Imagem binária
IDC	Imagem de Distância ao Complementar
$Im(i,j)$	Tom de cinza no pixel (i,j)
k	Permeabilidade, L^2 , mD

L	Comprimento da amostra na direção macroscópica do fluxo, L, m
$l(x,y)$	Função distribuição de intensidades luminosas em R^2
$M(P)$	26-vizinhança do ponto P localizado no centro da máscara
$M \times N$	Área total da imagem, L^2 , m^2
$N(P)$	8-vizinhança do ponto P localizado no centro da máscara
P	Pressão Piezométrica, m/Lt^2 , Pa
Q	Taxa de fluxo volumétrico (ou descarga), L^3/t , m^3/s
R^2	Espaço real em duas dimensões
R^3	Espaço real em três dimensões
S_i	Área de cada poro da classe i , L^2 , m^2
S_p	Área associada ao elemento de superfície, L^2 , m^2
$S(r_i)$	Área de poros associada a uma dada classe de poros i , L^2 , m^2
T	Limite de corte em função do tom de cinza no pixel (i,j)
T_P, T_Q	Distância transformada (IDC do ponto) de P e Q , respectivamente.
V_P	Elemento de superfície associado ao ponto P
X_C	Número de cavidades

X_K Número de componentes de uma estrutura.

X_E Número de Euler

X_T Número de túneis

$X_4(P)$ Número de passagem

Z Conjunto dos números inteiros

Z^2 Espaço discreto em duas dimensões

Z^3 Espaço discreto em três dimensões

Letras gregas

ε Porosidade

$\varepsilon(S)$ Fração em área total dos poros, L^2 , m^2

$\varepsilon(S, D)$ Fração de área de poros de tamanho superior a D , L^2 , m^2

μ Viscosidade, m/Lt , Ns/m^2

$\phi(i, j)$ Propriedade local da imagem

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 : Esboço representando os estreitamentos (ligações) e as cavidades (sítios).....	3
Figura 2.1: Representação de uma imagem binária.....	11
Figura 2.2: Representação esquemática do deslocamento de uma imagem sobre si mesma.....	12
Figura 2.3: Representação esquemática da função autocorrelação.....	12
Figura 2.4: Objetos distribuídos em função de seu tamanho.....	13
Figura 2.5: Gráfico de uma distribuição acumulada de poros.....	14
Figura 2.6: Ilustração de uma estrutura porosa bidimensional.....	15
Figura 2.7: Imagem reconstruída de um arenito berea (tamanho 80^3 voxels) pelo método da Gaussiana Truncada (Zhirong, 1997).....	16
Figura 2.8: Um exemplo de esqueleto, mostrando dois nós i e j.....	19

Figura 3.1: Ilustração da operação de erosão.....	22
Figura 3.2: Conjunto A (a), conjunto erodido por B_x (b). Imagem gerada pelo processador de imagem Imago/LMPT.....	22
Figura 3.3: Ilustração da operação de dilatação.....	23
Figura 3.4: Conjunto A (a), conjunto dilatado por B_x (b). Imagem gerada pelo processador de imagens Imago/LMPT.....	23
Figura 3.5: Representação das quatro vizinhanças e oito vizinhanças.....	26
Figura 3.6: Diferentes configurações para uma mesma reta em função da relação de vizinhos. 4-vizinhanças (a) e 8-vizinhanças (b).....	26
Figura 3.7: Ponderações para deslocamentos associados às métricas d_4 e d_8	27
Figura 3.8: Ponderações locais (Thiel, 1991).....	29
Figura 3.9: Máscaras de chanfro d_4 , d_8 , d_{3-4} , d_{5-7-11} (centradas em 0)	29
Figura 3.10: Esquema para cálculo da distância de chanfro entre dois pontos P e Q (Thiel, 1991).....	30
Figura 3.11: Esquema para algoritmo sequencial para obtenção de IDC com métrica d_{3-4}	31
Figura 3.12: Máscara com centro em (i, j)	32
Figura 3.13: Imagem de distância ao complementar com métrica d_{3-4} em duas varreduras (Thiel, 1991).....	32

Figura 3.14: Representação da imagem de distância ao complementar usando métrica d_4 à esquerda e d_8 à direita, para o mesmo objeto (Montanvert, 1987).....	33
Figura 3.15: Representação esquemática de um quarto de uma bola com seus respectivos raios.....	34
Figura 3.16: Diferentes configurações espaciais para a representação da circunferência em função da métrica usada.....	35
Figura 3.17: Imagem utilizada para a verificação da influência da métrica na obtenção da distribuição de poros com a operação de abertura.....	36
Figura 3.18: Influência da métrica na obtenção da distribuição de poros.....	37
Figura 3.19: Uma imagem original (a) com a fase branca submetida a uma operação de abertura (b).....	38
Figura 4.1: Esboço da linha mediana de uma imagem bidimensional.....	40
Figura 4.2: Imagem em preto (sólido) e branco (poro).....	40
Figura 4.3: Matriz numérica associada à imagem da Figura 4.2.....	41
Figura 4.4: Imagem de distância ao complemento IDC com métrica d_{3-4}	41
Figura 4.5: Imagem binária (a). Imagem de distância ao fundo com a métrica d_{3-4} e os centros máximos (b). Imagem com centro máximo após uso da tabela de correspondência de Arcelli (c)	42

Figura 4.6: Imagem com IDC usando a tabela de Arcelli.....	43
Figura 4.7: Imagem com pixels de pseudocentros máximos (em amarelo) sem uso da tabela de Arcelli.....	43
Figura 4.8: Imagem com pixels caracterizados como centros máximos (em vermelho), constituído o eixo mediano utilizando a tabela de correspondência de Arcelli.....	44
Figura 4.9: Convenção adotada para a vizinhança $N(P)$ de um pixel P	45
Figura 4.10: Caminhos 4-conectado (a) e 8-conectado (b) para uma malha quadrada.....	45
Figura 4.11: Componentes 4-conectado (a) e 8-conectado (b)	46
Figura 4.12: Exemplo de pixels-celas (em vermelho) que ocorrem nos estrangulamentos.....	46
Figura 4.13: Exemplos de pontos que são $C_8(P)$ ou $X_4(P)$. Não é $X_4(P)$ e também não é $C_8(P)$ (a). Exemplo de $C_8(P)$ (b). Exemplo de $X_4(P)$ (c).....	47
Figura 4.14: Esquema-exemplo para obtenção do gradiente.....	49
Figura 4.15: Imagem com a linha mediana da imagem da Figura 4.2. Em amarelo estão representados os pixels de conexão e, em vermelho, os pixels do eixo mediano.....	49

Figura 4.16: Imagem com a linha mediana afinada contínua e unitária.....	50
Figura 5.1: Esboço representando os raios dos estreitamentos (R_g) e das cavidades (R_a).....	51
Figura 5.2: Imagem com os grupos de pixels que representam os grupos-sítios (azul) e grupos-ligações (verde).....	53
Figura 5.3: Esquema para caracterização dos grupos-sítios (azul) e grupos-ligações (verde).....	55
Figura 5.4: Imagem com os objetos-sítios (área em azul) e objetos-ligações (área em verde).....	56
Figura 5.5: Esquema para obtenção da linha-limite da ligação.....	58
Figura 5.6: Figuras geométricas regulares retângulos e circunferências (Z^2) e cilindros e esferas (Z^3).....	59
Figura 5.7: Imagem binária produzida por um editor gráfico (a) e sua linha mediana (b).....	60
Figura 5.8: Imagem mostrando os grupos , em azul, que representam os sítios e ligações em verde (a). As ligações pintadas (b) da Figura 5.7.a.....	61
Figura 5.9: Imagem mostrando os sítios (área azul) e as ligações (área verde) da figura 5.7.a.....	61
Figura 5.10: Gráficos da função distribuição de ligações (a) e sítios (b) da Figura 5.7.a.....	62

Figura 5.11: Gráficos das funções distribuição de poros pelas técnicas do grafo da linha mediana (a) e operação abertura (b) da Figura 5.7.a.....	63
Figura 5.12: Gráfico de comparação das funções distribuições de poros pelas técnicas do grafo da linha mediana e operação abertura da Figura 5.7.a.....	64
Figura 5.13: Imagem binária produzida por um editor gráfico (a) e sua linha mediana (b).....	65
Figura 5.14: Imagem mostrando os grupos (em azul) que representam os sítios e ligações (em verde) (a) ,e as ligações pintadas (b) da Figura 5.13.a.....	65
Figura 5.15: Imagem mostrando os sítios(área azul) e as ligações (área verde) da Figura 5.13.a.....	66
Figura 5.16: Gráficos da função distribuição de ligações (a) e sítios (b) da Figura 5.13.a.....	67
Figura 5.17: Gráficos das funções distribuição de poros pelas técnicas da linha mediana (a) e operação abertura (b) da Figura 5.13.a.....	68
Figura 5.18: Gráfico de comparação das funções distribuições de poros pelas técnicas da linha mediana e operação abertura da Figura 5.13.a.....	69
Figura 6.1: Esquema para obtenção da linha mediana 3D.....	70

Figura 6.2: Ponderações locais para um voxel utilizando a métrica d_{3-4-5} (respectivamente para faces, arestas e vértices).....	71
Figura 6.3: Máscaras sequenciais para a métrica d_{3-4-5} , percurso Avante e percurso para Trás.....	72
Figura 6.4: Algumas das 26 posições das vizinhanças do ponto $I(x, y, z)$	73
Figura 6.5: Exemplo de componente 8-conectado de voxels rotulados mais que P	75
Figura 6.6: Exemplo de componente 4-conectado de voxels rotulados menores que P	75
Figura 6.7: Exemplo de triplo consecutivos vizinho de P que são rotulados 3.....	76
Figura 6.8: Planos xy , xz e yz e seus 8-vizinhos.....	77
Figura 6.9: Ilustração do conceito de conectividade. Número de conectividade igual a 1 (a) e (b). Número de conectividade igual a 2 (c). Número de conectividade igual a 3 (d). Tabela com parâmetros topológicos (e).....	79
Figura 6.10: Representação de três formas básicas: objeto fechado (a), objeto com túnel (b) e objeto com cavidade (c). Parâmetros topológicos (d).....	80
Figura 6.11: Imagem de um paralelogramo de 40^3 (a). Superfície mediana (b). Linha mediana 3D (c).....	81
Figura 6.12: Imagem de um paralelogramo com túnel de 40^3 (a). Superfície mediana (b). Linha mediana 3D (c).....	82
Figura 6.13: Imagem de uma cavidade de 40^3 (a). Superfície	

mediana (b). Linha mediana 3D (c).....	83
Figura 7.1: Imagem da tela do aplicativo Imago, executando o grafo da linha mediana 2D.....	85
Figura 7.2: Imagem berea 320220 colorida (a) Imagem binarizada do berea 320220 (b).....	87
Figura 7.3: Imagem berea 320220 com linha mediana (a) e a caracterização das ligações (b).....	88
Figura 7.4: Imagem berea 320220 com a caracterização de sítios (azul) e ligações (verde).....	89
Figura 7.5: Gráfico da função distribuição de ligações (a) e sítios (b) da Figura 7.2.b.....	90
Figura 7.6: Gráfico da função distribuição de poros pelo grafo da linha mediana da Figura 7.2.b.....	90
Figura 7.7: Distribuição de poros da imagem da Figura 7.2.b. obtida pela técnica da operação de abertura.....	91
Figura 7.8: Comparação das distribuição de poros para a imagem 320220.....	91
Figura 7.9: Imagem colorida berea 318238 (a). Imagem binária (b).....	92
Figura 7.10: Linha mediana da Imagem berea 318238 (a) caracterização das ligações (b).....	93
Figura 7.11: Imagem berea 318238 com a caracterização dos sítios e ligações.....	94

Figura 7.12: Distribuições pelo grafo da linha mediana, de ligações (a) e sítios (b) da Figura 7.9.b.....	95
Figura 7.13: Gráfico da função distribuição de poros pela técnica do grafo da linha mediana da Figura 7.9.b.....	95
Figura 7.14: Distribuição de poros obtidas pelas técnicas da linha mediana e operação de abertura para a Figura 7.9.b.....	96
Figura 7.15: Imagem reconstruída do berea 320220 (50^3 voxels).....	98
Figura 7.16: Imagem com superfície mediana na Figura 7.15.....	99
Figura 7.17: Imagem com a linha mediana 3D da Figura 7.15.....	100
Figura 7.18: Imagem representativa da linha mediana 3D da Figura 7.15. Os voxels azuis possuem dois vizinhos e os voxels vermelhos possuem mais de dois vizinhos.....	101
Figura 8.1: Esboço de um poro <i>ink bottle</i>	105
Figura AI.1: Fluxograma para a obtenção da linha mediana 2D afinada.....	115
Figura AI.2: Fluxograma para eliminação dos últimos pixels.....	116
Figura AI.3: Fluxograma para obtenção dos sítios-grupos e ligações-grupos.....	117
Figura AI.4: Fluxograma de rotulação e obtenção dos sítios e ligações-objetos.....	118
Figura AI.5: Fluxograma para obtenção da linha-limite.....	119

Figura AI.6: Fluxograma para pintura e determinação das áreas dos sítios e ligações.....120

Figura AII.1: Fluxograma para obtenção da linha mediana 3D.....122

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Erros associados à aproximação discreta da distância Euclidiana.....35

Tabela 5.1: Dados dos grupos de acordo com a imagem das Figuras 5.2 e 5.4.....56

Tabela 5.2: Dados dos objetos-sítios e objetos-ligações
de acordo com a imagem da Figura 5.4.....57

Tabela 5.3: Dados dos diâmetros de objetos-sítios e objetos-ligações
de acordo com a Figura 5.4.....59

RESUMO

O presente trabalho trata da caracterização estatística da geometria de meios porosos através de técnicas de análise de imagens. A geometria da microestrutura porosa é complexa, envolvendo os aspectos de forma dos poros e das relações de conexão entre os poros. Este trabalho considera a fase poro da estrutura como sendo composta de cavidades (ou sítios), que são as regiões de maior volume, e os estreitamentos (ou ligações), que interligam as cavidades. Para a descrição da fase poro em regiões (objetos) com as desejadas características de sítios e ligações, é feita inicialmente a determinação da linha mediana. A linha mediana consiste em uma representação filiforme centrada nos objetos que compõem a fase poro, e é representativa da forma dos objetos. A partir da linha mediana é construído um grafo, que consiste em um diagrama com as informações dos tamanhos dos objetos e das relações de conexão entre os objetos. Com as informações do grafo da linha mediana, caracteriza-se a fase poro em regiões de sítios e de ligações. O método é utilizado em imagens contendo objetos com formas geométricas conhecidas e em imagens de rochas reservatório, determinando-se as distribuições de tamanhos de sítios e ligações. Faz-se uma análise comparativa entre a técnica de obtenção da distribuição de tamanhos de poros a partir do grafo da linha mediana com a técnica da operação de abertura morfológica. Para a caracterização da linha mediana de estruturas porosas tridimensionais, implementou-se um algoritmo que consiste em uma adaptação do algoritmo para estruturas bidimensionais. Para fins de análise do comportamento do algoritmo, determinou-se a linha mediana de alguns objetos tridimensionais, bem como de uma imagem tridimensional de rocha obtida com o método de reconstrução por Gaussiana Truncada.

Palavras-chave: meios porosos, imagem, linha mediana, distribuição de tamanho de poros.

ABSTRACT

This work deals with the statistical characterization of the porous media geometry by image analysis techniques. The porous microstructure geometry is complex, involving pores shape and the connections between pores. This work considers the pore phase of the structure as being composed of cavities (or sites), which are the areas of larger volume, and the necks (or links) that interconnect the cavities. For pore phase description in regions (objects) with the desired characteristics of sites and links, it is initially made the determination of the median line. The median line consists of a filiform representation centered in the objects composing the pore phase, and it represents the shapes of the objects. From the median line, it is built a graph, which consists of a diagram with the information of the objects sizes and the relations of connection between them. With the information of the median line graph, it is characterized the pore phase in regions of sites and links. The method was used in images containing objects with known geometry and in images of reservoir rocks, to determine the size distributions of sites and links. Here, it is made a comparative analysis between the technique of the median line graph and the technique of morphologic opening. For the characterization of the median line of tridimensional porous structures, it was developed an algorithm that is an adaptation of the algorithm to bidimensional structures. For the analysis of the algorithm, it was determined the median line of some tridimensional objects, as well as of a tridimensional image of rock reconstructed by truncated gaussian method.

Key words: porous media, image, median line, pore size distribution

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1- Problemas envolvendo meios porosos

Processos de fixação e transporte de fluidos em materiais porosos ocorrem em diversos campos da ciência e da engenharia. Podem-se encontrar esses problemas, por exemplo, com estruturas porosas na agricultura, na construção civil, na engenharia do petróleo.

Em todos esses problemas, precisa-se lidar com a complexidade geométrica do meio, a qual afeta o deslocamento de um ou mais fluidos ou a dispersão (mistura) de um fluido com outro. Cada processo pode, em si mesmo, ser muito complexo. Por exemplo, o deslocamento de um fluido por outro pode ser afetado por muitos mecanismos diferentes, que podem envolver transferência de calor e massa e mudança de fase. Se a matriz sólida do meio poroso é deformável, sua estrutura pode mudar durante o fluxo ou com a ocorrência de um outro fenômeno. Se o fluido é reativo, ou se carrega partículas sólidas de várias formas, tamanhos e cargas elétricas, a estrutura do meio pode mudar, devido à reação do fluido com a superfície dos poros, ou pode ocorrer uma interação físico-química entre as partículas e a superfície dos poros.

Freqüentemente, são consideradas duas classes de meios porosos desordenados. Na primeira classe, estão os meios porosos que são microscopicamente desordenados, mas macroscopicamente homogêneos, contanto que sejam suficientemente grandes; tais meios podem ser caracterizados pelas propriedades

espaciais, como porosidade e distribuição de poros, e pelas propriedades de transporte, como permeabilidade. Na segunda classe, há os meios porosos que são macroscopicamente heterogêneos e que apresentam diferentes propriedades quando da avaliação de diferentes regiões. Neste trabalho, restringe-se a discussão somente a meios porosos homogêneos.

Na análise de vários fenômenos físicos, podem ser distinguidos dois níveis: microscópico e macroscópico. O nível microscópico corresponde ao conhecimento do valor das propriedades em todos os pontos. No nível macroscópico, as propriedades são avaliadas pela média dos valores microscópicos sobre uma amostra suficientemente grande; por isso, os engenheiros estão interessados normalmente neste nível.

1.2- Metodologia para a caracterização de meios porosos

Em uma estrutura suficientemente grande, observa-se que a complexidade da estrutura do material poroso é composta de duas fases: uma fase poro e uma fase sólida. Quando um fluido invade esse material, constata-se a relação intrínseca que existe entre a geometria do meio e os fenômenos físicos que ocorrem nessa estrutura. Diante disso, é fundamental que se faça uma caracterização geométrica da microestrutura do material.

A fase poro pode ser abstraída como uma fase com cavidades e estreitamentos (ou gargantas). Os estreitamentos, que são chamadas de *ligações*, são os locais onde o fluido encontra maior resistência ao escoamento. As cavidades, que são chamadas de *sítios*, são as regiões onde está contido o maior volume de fluido (Figura 1.1).

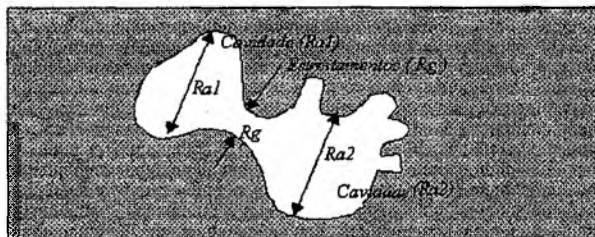


Figura 1.1: Esboço representando os estreitamentos (ligações) e as cavidades (sítios).

No presente trabalho, a caracterização geométrica de microestruturas porosas é feita através do grafo da linha mediana, obtida para a fase poro em imagens bidimensionais da microestrutura. São utilizadas imagens de rochas reservatório obtidas com o uso de microscopia ótica em lâminas delgadas.

A linha mediana consiste em uma representação da estrutura porosa contendo informações de fácil manipulação acerca dos aspectos de forma dos poros (morfologia) e das relações de conectividade entre os poros (topologia). Sua determinação é feita em imagens binárias, onde estão definidas as regiões de poros e sólidos da estrutura. Para essa determinação em imagens bidimensionais, implementou-se um algoritmo proposto por Di Baja (1991). A partir da linha mediana é construído um grafo descritivo dos tamanhos de poros e das relações de conexão entre os poros. Com essas informações e com a abstração dos poros em cavidades e estreitamentos, determinam-se as distribuições de cavidades (sítios) e de gargantas (ligações) da fase poro.

Desenvolveu-se também um algoritmo para a obtenção da linha mediana de estruturas tridimensionais (3D), fazendo-se uma extensão do algoritmo para estruturas 2D, proposta por Di Baja (1991).

Os códigos computacionais desenvolvidos no presente trabalho foram inseridos em um software de processamento de imagens (Imago) desenvolvido pelo Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT) da Universidade Federal de Santa Catarina e pela empresa de software Engineering Simulation and Scientific Software (ESSS).

1.3- Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- a caracterização da distribuição de tamanho de poros em imagens binárias 2D da microestrutura de rochas reservatório com o método do grafo da linha mediana, determinando-se separadamente a distribuição de sítios e a distribuição de ligações;
- uma análise comparativa da distribuição de poros total (sítios mais ligações), obtida com a linha mediana com a distribuição de poros obtida com a técnica de abertura morfológica;

- para o caso tridimensional, objetiva-se obter uma linha contínua representativa da microestrutura porosa que conserva a conectividade, isto é, que a linha mediana 3D e a microestrutura original de poros tenham a mesma topologia.

A motivação para o estudo de técnicas de análise de imagens aplicadas à pesquisa de materiais porosos surgem da possibilidade de obtenção de dados sobre as naturezas morfológica e topológica da estrutura do material, contribuindo para complementar técnicas experimentais usuais como, por exemplo, a porosimetria a mercúrio.

Objetiva-se comparar a técnica de obtenção da distribuição de poros a partir do grafo da linha mediana com a técnica da operação abertura implementada por Fernandes (1994). O algoritmo associado à técnica da abertura visando à obtenção da distribuição de poros mostra-se mais simples que o correspondente associado ao grafo da linha mediana. Entretanto, a técnica do grafo da linha mediana apresenta a possibilidade de obtenção de várias características estatísticas do espaço poroso. Dessa forma, há a possibilidade da obtenção de informações, tais como a conectividade entre os elementos que formam o objeto (sítios e ligações).

A operação de abertura atribui poros de pequenos diâmetros para as rugosidades e para os cantos dos poros, superestimando a contribuição desses sobre a distribuição de tamanhos de poros. O método do grafo da linha mediana propõe-se a contornar esse problema, caracterizando os poros como objetos distintos, separados por estreitamentos e com relações de conexão precisas e possíveis de serem determinadas a partir da imagem 2D, da qual se gera a linha mediana.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo II, faz-se uma exposição de conceitos gerais associados à utilização de técnicas de análise de imagens, bem como de parâmetros utilizados na caracterização de estruturas porosas; no capítulo III, são apresentados os conceitos básicos de geometria discreta e de morfologia matemática, definindo-se suas operações básicas; no capítulo IV, apresenta-se a proposta de Di Baja (1991) para a determinação da linha mediana de estruturas bidimensionais; no capítulo V, desenvolve-se o algoritmo que, a partir do grafo da linha mediana, permite a determinação das distribuições de sítios e ligações em imagens bidimensionais; o algoritmo é utilizado em imagens geradas por um editor gráfico, visando à comparação da distribuição de poros total (sítios mais ligações) com aquela obtida com a técnica de abertura morfológica. No capítulo VI, faz-se uma adaptação do

algoritmo de Di Baja (1991), propondo-se um algoritmo para a determinação da linha mediana de estruturas tridimensionais; no capítulo VII, o método grafo da linha mediana 2D e o método de abertura morfológica são utilizados em imagens binárias de rochas reservatório. Finalmente, o capítulo VIII é dedicado a conclusões, comentários e sugestões de trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

ANÁLISE DE IMAGENS DE MICROESTRUTURAS POROSAS

Neste trabalho, utilizam-se técnicas de análise de imagens para a caracterização da geometria de meios porosos. No presente capítulo, apresentam-se conceitos fundamentais associados a imagens digitais, bem como a definição de parâmetros que visam à caracterização da geometria de imagens binárias. Discorre-se ainda, de forma sucinta, sobre modelos tridimensionais de estruturas porosas e a determinação computacional da permeabilidade intrínseca como proposto em Zhirong (1997).

2.1-Imagens digitais

A questão associada à manipulação de variáveis discretas para a representação de um fenômeno contínuo é freqüente nos domínios de física e de matemática. Define-se como analógica toda representação à qual estão associadas variáveis que se modificam de modo contínuo em um espaço R^n . A observação visual de uma cena consiste em uma forma analógica em R^3 , e uma fotografia é uma forma analógica em R^2 .

Por outro lado, uma matriz assumindo valores em um intervalo de Z , constituindo uma escala de níveis de cinza, é um exemplo de representação discreta de uma imagem.

A uma imagem bidimensional de natureza analógica está associada em cada ponto (x,y) uma função $l(x,y)$, correspondendo a uma distribuição de intensidades luminosas em \mathbb{R}^2 . Esta imagem está ligada a um plano dado pelo captor, que é a projeção da cena observada. A representação numérica da imagem consiste em transformar a função $l(x,y)$ em uma função $f(P)$, através de:

$$f(P) = \frac{1}{S_P} \iint_{V_P} l(x,y) dx dy \quad (2.1)$$

onde P pertence a um domínio desmembrado de \mathbb{R}^2 ; V_P designa o elemento de superfície associado ao ponto P e S_P é a área associada ao elemento de superfície.

Na equação (2.1), necessita-se definir os pontos P e a vizinhança V_P a eles associada. Isso é feito escolhendo-se uma malha para a representação no espaço discreto. O usual é a representação em uma malha regular, sendo a malha quadrada a mais utilizada; de fato, ela corresponde à codificação fornecida pela maioria dos captadores e coincide com a estrutura de dados clássica de uma matriz (Chassery et Montanvert, 1991). A função $f(P)$ assume valores nos pontos P de coordenadas inteiras (i,j) , onde i pertence a um intervalo $[1,M]$ de \mathbb{Z}^2 e j , a um intervalo $[1,N]$ de \mathbb{Z}^2 .

Assim, a imagem discreta de tamanho $M \times N$ é codificada em uma matriz Im de mesmo tamanho, onde $Im(i,j) = f(P)$, sendo P denominado pixel (*picture element*) da imagem.

Uma imagem em tons de cinza corresponde a uma representação onde cada pixel assume um valor em um intervalo $[0,L-1]$ de \mathbb{Z}^2 , em que o valor 0 é associado ao preto; o valor $(L-1)$ corresponde ao branco e os valores intermediários constituem um *degradê* de tons de cinza. Um caso freqüente corresponde a $L = 256$, sendo a imagem codificada em uma estrutura de dados 8-bits.

No presente trabalho, utilizam-se imagens coloridas da microestrutura de rochas que são adquiridas e codificadas no formato RGB (Red, Green, Blue). Uma imagem codificada no modelo de cores RGB consiste em três planos de imagens independentes, um para cada cor primária.

2.2 – Imagens binárias

A binarização constitui uma etapa fundamental no processamento de imagens, na qual uma imagem originalmente colorida ou em tons de cinza é transformada em uma imagem binária. Em geral, os processamentos envolvendo a quantificação de parâmetros geométricos - por exemplo a distribuição de tamanhos de poros - são efetuados sobre imagens binárias. Desta forma, a imagem binária obtida deve representar realisticamente a imagem original. Essa é uma tarefa difícil, não existindo um método de segmentação universal em vista dos diferentes tipos de textura das imagens.

A segmentação binária de uma imagem em tons de cinza pode ser vista como uma transformação através de uma função da forma (Gonzalez et Wood, 1992):

$$T = T[i, j, Im(i, j), \phi(i, j)] \quad (2.2)$$

onde $Im(i, j)$ denota o tom de cinza no pixel (i, j) e $\phi(i, j)$ é alguma propriedade local da imagem como, por exemplo, o tom de cinza-médio em uma vizinhança em torno de (i, j) .

A imagem binária é dada por:

$$I_{bin}(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{se } Im(i, j) \leq T \\ 1, & \text{se } Im(i, j) > T \end{cases} \quad (2.3)$$

T é denominado de limite de corte e quando depende apenas de $Im(i, j)$, a segmentação é dita *global*. Se, adicionalmente, T depende de $\phi(i, j)$, ela é dita *local*.

As imagens coloridas que serão utilizadas no capítulo VII, adquiridas no modelo de cores RGB, são transformadas para o modelo de cores HSI (Hue, Saturation e Intensity) (Gonzalez et Wood, 1992), para a realização do processamento de binarização. Utilizou-se um método de binarização disponibilizado no software Imago (LMPT/ESSS), denominado de *maximização da variância interclasse* (Coster et Chermant, 1989). Este método, originalmente desenvolvido para imagens em

tons de cinza, foi estendido por Philippi et Fernandes (1995) para a aplicação em cada um dos canais H, S e I das imagens.

2.3 – Parâmetros associados à geometria de imagens binárias

Definida uma imagem binária da rocha, onde estão identificadas as regiões de poros e sólidos, procura-se uma caracterização estatística da fase de interesse ao escoamento de fluidos, a fase poro. A preocupação com a geometria da fase poro envolve a morfologia, essencialmente a distribuição de tamanho de poros, e a topologia, associada à organização espacial da fase poro. A caracterização geométrica objetiva a obtenção de parâmetros estatísticos, dentre os quais os principais são: porosidade, função de autocorrelação e a distribuição de tamanho de poros.

2.3.1 - Função de fase

Em uma imagem binária, como está esquematizada na Figura 2.1, define-se uma função de fase dada por:

$$Z(\vec{r}) = \begin{cases} 1, & \text{se } \vec{r} \text{ pertence à fase poro} \\ 0, & \text{se não.} \end{cases} \quad (2.4)$$

onde $\vec{r} = \vec{r}(x, y)$ denota um vetor posição para cada pixel da imagem, em relação a uma origem arbitrária.

Dessa forma, a média da função de fase corresponderá à porosidade ε associada ao domínio da imagem, dada por:

$$\langle Z(\vec{r}) \rangle = \varepsilon \quad (2.5)$$

onde o símbolo $\langle \rangle$ denota a média estatística para o domínio da imagem em consideração.

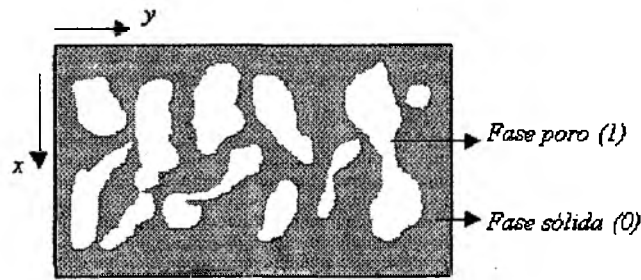


Figura 2.1: Representação de uma imagem binária.

2.3.2.- Função de autocorrelação

Define-se uma função de autocorrelação para o espaço poroso, a qual, com a hipótese de meio estatisticamente homogêneo, é escrita como:

$$C(\vec{u}) = \langle Z(\vec{r}) \cdot Z(\vec{r} + \vec{u}) \rangle \quad (2.6)$$

Considerando-se um meio isotrópico, $C(\vec{u})$ dependerá apenas de $u = |\vec{u}|$. Neste caso, tem-se:

$$C(u) = \langle Z(x, y) \cdot Z(x + u, y) \rangle \quad (2.7)$$

definida para cada deslocamento arbitrário u no plano da imagem.

Pode-se determinar a função de autocorrelação deslocando-se a imagem sobre ela mesma na direção de x (ou de y) em múltiplos do pixel, calculando-se a frequência de resultados associados à intersecção de dois pixels pertencentes aos poros (veja-se uma ilustração na Figura 2.2).

Na Figura 2.3, faz-se uma representação esquemática da função de autocorrelação $C(u)$. A autocorrelação dá a probabilidade de que dois pixels separados por uma distância u pertençam à fase de poros. Os valores estatísticos da autocorrelação

variam de ε , para deslocamento nulo, para em torno de ε^2 , para deslocamentos além de $u = L_C$, que é denominado de *alcance de correlação*.

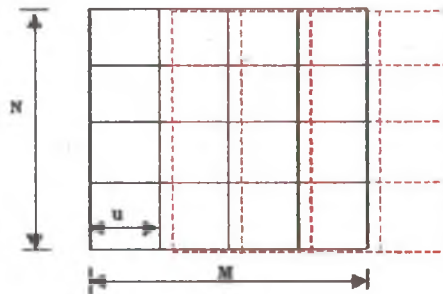


Figura 2.2: Representação esquemática do deslocamento de uma imagem sobre si mesma.

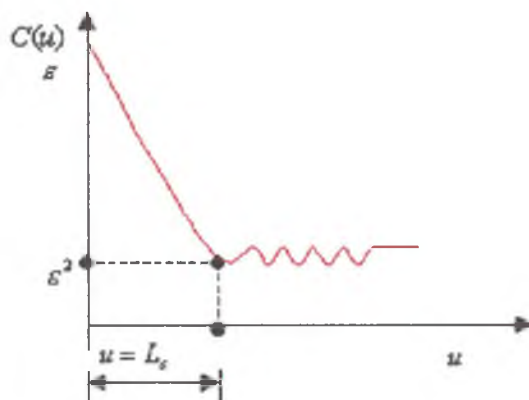


Figura 2.3: Representação esquemática da função autocorrelação.

2.3.4 - Distribuição de tamanhos de poros

A questão fundamental associada à determinação da distribuição de tamanho de poros de uma estrutura reside no modo de partição da fase poro, em classes de tamanho de poro, por causa da conectividade e irregularidade geométrica que esta fase apresenta.

Nos capítulos seguintes, será mostrado como as técnicas de abertura e do grafo da linha mediana operam essa partição, bem como as implicações associadas, a esse processo.

No momento, para a definição matemática da distribuição de tamanho de poros, considere-se a fase poro particionada em n classes de tamanho de poros crescentes, $1, 2, 3, \dots, n$, com seus respectivos raios de poros r_1, r_2, \dots, r_n (veja-se ilustração na Figura 2.4).

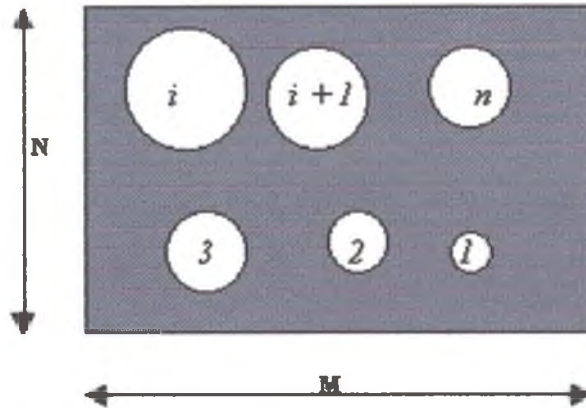


Figura 2.4: Objetos distribuídos em função de seus tamanhos.

Assim, a área de poros $S(r_i)$ associada a uma dada classe de tamanhos de poros i , normalizada pela área total da imagem $M \times N$, será:

$$S(r_i) = \frac{S_i H_i}{M \times N} \quad (2.8)$$

onde S_i é a área de cada poro da classe i ; H_i é o número de poros da classe i . Dessa forma, a porosidade da imagem será:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{i=n} S(r_i) \quad (2.9)$$

A distribuição acumulada de poros $F(r_i)$, normalizada pela porosidade da imagem, será dada por:

$$F(r_i) = \frac{1}{\varepsilon} \sum_{j=1}^i S(r_j), \text{ onde } 0 \leq F(r_i) \leq 1. \quad (2.10)$$

Na Figura 2.5, tem-se uma representação esquemática de uma distribuição acumulada de poros.

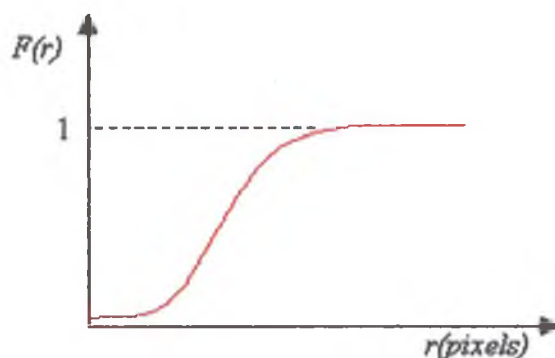


Figura 2.5: Gráfico de uma distribuição acumulada de poros.

2.4 – Modelos de Estruturas Porosas

As propriedades físicas macroscópicas de materiais porosos, como a permeabilidade e as curvas de pressão capilar, são fortemente dependentes da geometria da sua microestrutura. Assim, procuram-se modelos representativos da estrutura do material visando à avaliação numérica de propriedades macroscópicas de transporte de calor e massa. As informações concernentes à estrutura de materiais são frequentemente obtidas por meio de ensaios de intrusão de mercúrio, isotermas de adsorção e, mais recentemente, com a utilização de técnicas de análise de imagens de seções 2D do material (Adler et alii, 1990; Philippi et alii, 1994; Fernandes, 1994; Pieritz, 1994). Técnicas mais recentes e avançadas têm sido utilizadas, permitindo a obtenção de informações da geometria 3D diretamente, como a de microtomografia (Hazlett, 1995) e a de seccionamento serial (Koplik et alii, 1984; Kwiecien et alii, 1990). Contudo, tais técnicas são muito mais onerosas economicamente do que as citadas anteriormente.

Através de técnicas de análise de imagens, a partir da caracterização de parâmetros geométricos relevantes em imagens bidimensionais, procura-se construir modelos de estrutura que sejam representativos da estrutura real do material para a simulação de fenômenos físicos.

2.4.1. Redes de percolação

Redes de percolação são bastante utilizadas para a modelação de estruturas porosas, em que é feita uma representação da fase poro em cavidades (sítios) e estreitamentos (ligações), conectando as cavidades. Uma ilustração de rede de sítios e ligações é mostrada na Figura 2.6.b, a qual procura representar a estrutura porosa da Figura 2.6.a.

Para a construção de uma rede de percolação, são essenciais as informações das distribuições de tamanho de sítios e de ligações e do número de coordenação (número de ligações que chega em cada sítio). Tais informações podem ser obtidas a partir do método do grafo da linha mediana, que será desenvolvido nos próximos capítulos deste trabalho.

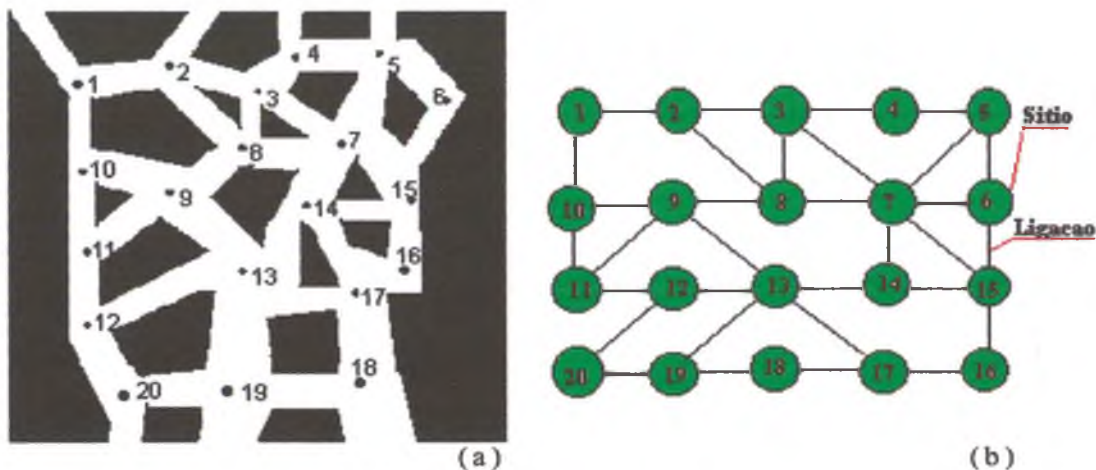


Figura 2.6: Ilustração de uma estrutura porosa bidimensional (a); rede de sítios e ligações (b).
Chatzis et Dullien (1982).

2.4.2 - Reconstrução de imagens 3D. Método da Gaussiana Truncada

O denominado *processo de reconstrução* consiste na geração de imagens 3D a partir de informações estatísticas quantificadas nas imagens 2D. A

idéia de base é a geração da imagem 3D de tal maneira que suas seções planas conservem as informações estatísticas da imagem 2D original da rocha.

O método de reconstrução chamado de *Gaussiana Truncada* apóia-se na consideração de que a microestrutura da rocha, representada por uma imagem binária, consiste em um processo estocástico cuja função de fase pode ser descrita por seus dois primeiros momentos: a porosidade e a função de autocorrelação, equações 2.5 e 2.6, respectivamente.

As imagens reconstruídas 3D utilizadas no capítulo VII deste trabalho, com a finalidade de determinação da linha mediana 3D, foram obtidas pelo método da *Gaussiana Truncada* como proposto por Zhirong (1997), assumindo-se que o meio é estatisticamente homogêneo e isotrópico.

Na Figura 2.7, mostra-se uma imagem 3D obtida pelo método da *Gaussiana Truncada* para um arenito berea.

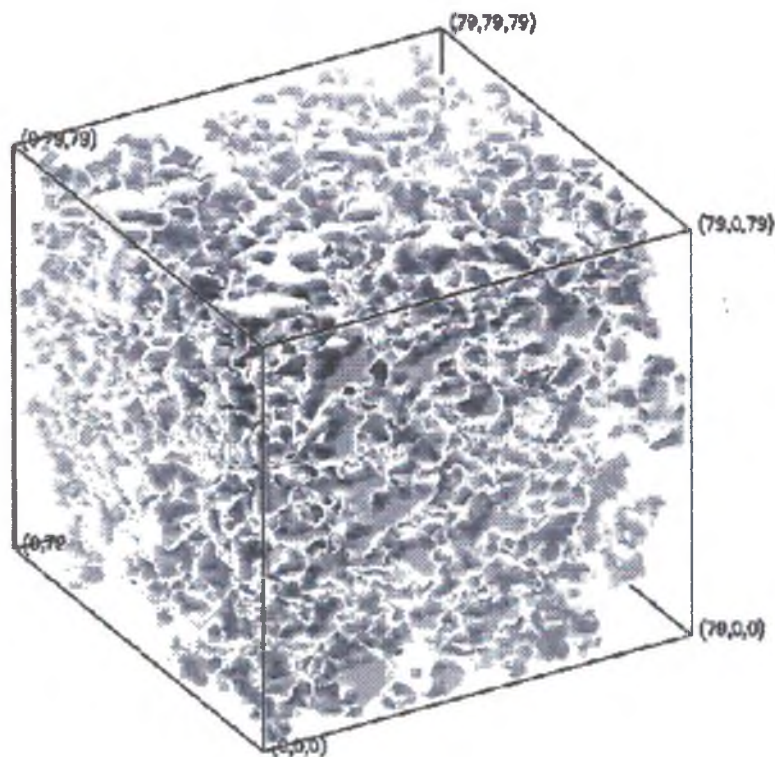


Figura 2.7: Imagem reconstruída de um arenito berea (tamanho 80^3 voxels) pelo método da *Gaussiana Truncada* (Zhirong, 1997).

2.5 – Permeabilidade

Permeabilidade é o termo usado para a condutividade dos meios porosos com relação à passagem de um fluido newtoniano; é uma medida quantitativa da capacidade do meio em permitir a passagem de fluido (Dullien, 1992). Essa quantidade é a permeabilidade intrínseca k , que aqui será chamada de *permeabilidade*.

A permeabilidade k é definida pela lei de Darcy, com a consideração de escoamento permanente unidirecional de fluido newtoniano com baixa velocidade:

$$Q = -(kA / \mu)(\Delta P / L) \quad (2.11)$$

onde Q é a taxa de fluxo volumétrico (ou descarga); A é a área da seção da amostra normal ao escoamento macroscópico; L é o comprimento da amostra na direção macroscópica do escoamento; $\Delta P = P_1 - P_2$ é a diferença de pressão hidrostática na amostra e μ é a viscosidade do fluido.

A unidade de permeabilidade é o darcy. Um material poroso tem permeabilidade igual a 1 darcy, se uma diferença de pressão de 1 atm produz um fluxo volumétrico de $1 \text{ cm}^3 / \text{seg}$ de um fluido com 1 cP de viscosidade, através de uma amostra cúbica com lados de 1 cm. Assim,

$$1 \text{ darcy} = \frac{1(\text{cm}^3 / \text{seg})1(\text{cP})}{1(\text{cm}^2)1(\text{atm} / \text{cm})},$$

que é igual a $0,987 \mu\text{m}^2$.

Zhirong (1997) propõe a determinação da permeabilidade intrínseca em estruturas 3D reconstruídas com o modelo de Gaussiana Truncada a partir da definição de um esqueleto do espaço poroso. Para a obtenção do esqueleto, utiliza um algoritmo de *thinning*, que foi desenvolvido por Ma (1994 e 1995), de forma que o esqueleto obtido conserve a topologia do espaço poroso da estrutura reconstruída. Em uma estrutura reconstruída cúbica, todas as faces são assumidas impermeáveis exceto duas opostas, nas quais é imposta a diferença de pressão ΔP . É assumido um escoamento com baixo número de Reynolds. Na Figura 2.8, mostra-se, como ilustração,

o esqueleto para a fase sólida de uma imagem bidimensional. Ao esqueleto é associado um grafo descritivo das cavidades (nós) e ligações. As ligações e nós do grafo são compostas de pontos com exatamente dois vizinhos e três ou mais vizinhos, respectivamente. Uma estrutura de dados é construída de forma a especificar as relações de correspondência entre os nós, ou seja, um mapeamento dos nós conectados a cada nó. A resistência ao escoamento em um ponto ligação é caracterizada em termos de um diâmetro hidráulico equivalente, associado à área de poro perpendicular ao esqueleto no ponto ligação considerado.

A condutância g_L em um ponto ligação é calculada assumindo um escoamento de Poiseuille, sendo dada por:

$$g_L = \frac{\pi d_H^4}{128 \mu l}, \quad (2.12)$$

onde μ é a viscosidade do fluido e l é o comprimento da ligação, igual a 1 pixel.

A condutância g_i do fluido em um nó é estimada através de uma relação descrita em Koplik (1983):

$$g_i = \frac{r_i^3}{3\mu}, \quad (2.13)$$

onde r_i é o raio da ligação conectada ao nó i .

A resistência total ao escoamento de fluido entre dois nós conectados i e j , g_{ij} é a soma das resistências dos nós e as resistências dos pontos ligações conectando os nós:

$$\frac{i}{g_{ij}} = \frac{1}{g_i} + \sum \frac{1}{g_L} + \frac{1}{g_j}, \quad (2.14)$$

O fluxo volumétrico entre dois nós i e j é dado por:

$$Q_{ij} = g_{ij} (P_i - P_j), \quad (2.15)$$

onde P_i e P_j são as pressões nodais. Com a consideração de fluidos incompressíveis, a conservação da massa requer:

$$\sum_j Q_{ij} = 0, \quad (2.16)$$

onde j envolve todas as ligações conectadas ao nó i .

Dessa forma, a equação (2.16) com as condições de contorno descritas anteriormente forma a solução completa para o escoamento estacionário de fluido incompressível no sistema. O campo de pressões é então determinado, resolvendo-se o sistema de equações lineares associado. Determina-se assim o fluxo macroscópico Q , e a permeabilidade intrínseca k é calculada pela lei de Darcy.

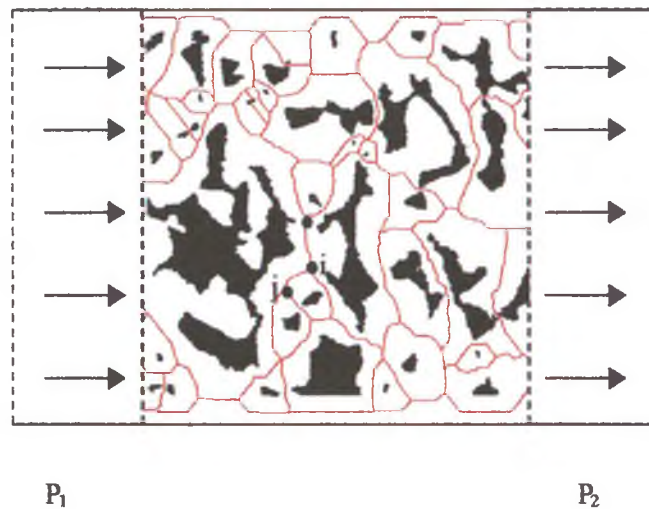


Figura 2.8. Um exemplo de esqueleto, mostrando dois nós i e j .

Um ponto principal na metodologia de Zhirong (1997) consiste na determinação do esqueleto da fase poro. A linha mediana de estruturas 3D implementada neste trabalho pode ser utilizada para avaliar a permeabilidade, em substituição ao esqueleto 3D implementado por Zhirong (1997).

CAPÍTULO III

MORFOLOGIA MATEMÁTICA

Composta das palavras gregas *morpho* (forma) e *logos* (estudo), a morfologia trata das formas que a matéria pode tomar. A morfologia matemática está fundamentada na teoria dos conjuntos e permite que se obtenha uma descrição da forma dos objetos de uma imagem. A idéia de base consiste em comparar os objetos da imagem com outro objeto de forma conhecida, um padrão, chamado de *elemento estruturante*.

A morfologia matemática, que representa um ramo do processamento não-linear, permite processar imagens com objetivos de realce, de segmentação, de detecção de bordas, de esqueletização, de afinamento, dentre outros (Facon, 1996). No presente trabalho, utiliza-se a técnica de abertura morfológica para a determinação da distribuição de tamanho de poros, em imagens binárias bidimensionais, visando a uma análise comparativa com a determinação a partir do grafo da linha mediana.

3.1- Operações de erosão e dilatação

As operações elementares da morfologia matemática são a erosão e a dilatação, que serão descritas a seguir. A combinação dessas operações resulta em outras duas: a operação de abertura (erosão seguida de dilatação) e a operação de fechamento (dilatação seguida de erosão).

3.1.1- Erosão

Seja um objeto A pertencente a um espaço discreto Z^2 e um elemento estruturante B , como, por exemplo, um círculo. Defme-se o erodido de A por $A \ominus B$, como sendo o conjunto de pontos x nos quais o centro geométrico de B implantado esteja contido em A (veja-se ilustração na Figura 3.1). O erodido é dado por

$$(3.1)$$

Na Figura 3.2.a, mostra-se um exemplo de uma imagem gerada por um editor de imagens. Nesta imagem, realizou-se uma operação de erosão utilizando-se como elemento estruturante um octógono de um dado tamanho, com a finalidade de se observar os efeitos da operação de erosão. A imagem resultante após a aplicação da operação de erosão é mostrada na Figura 3.2.b, na qual pode ser observada a eliminação de pequenos objetos (menores que o elemento estruturante utilizado), bem como a diminuição (o descascamento) dos objetos maiores. Ainda, em função do tamanho do elemento estruturante, pode haver a separação de um objeto em dois ou mais objetos.

A definição de elementos estruturantes para o espaço discreto Z^2 será feita na seção 3.4.

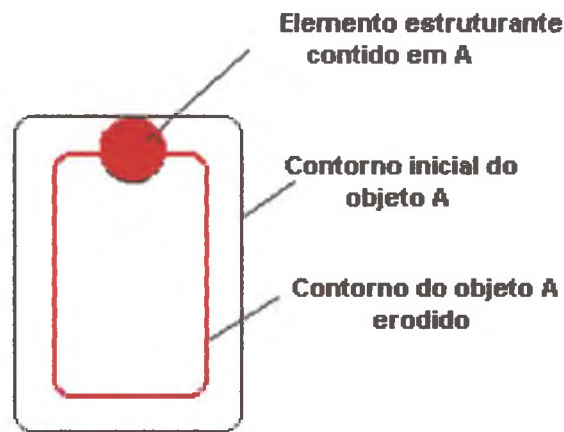


Figura 3.1: Ilustração da operação de erosão.

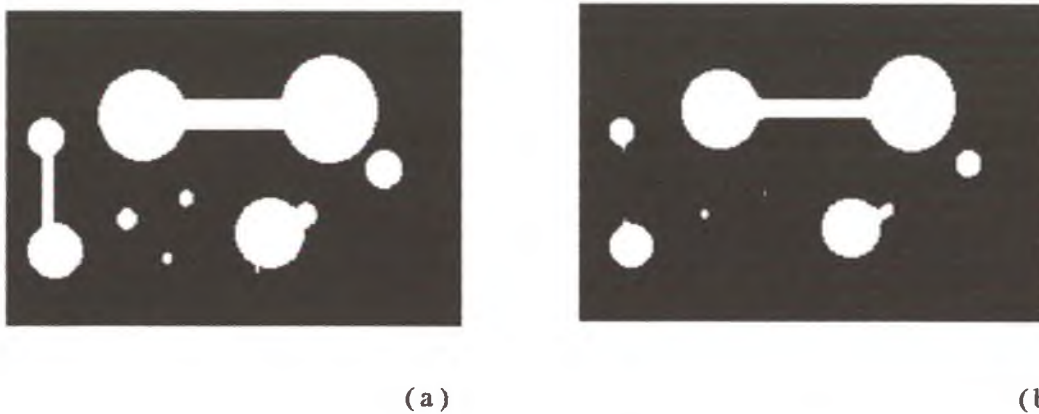


Figura 3.2: Conjunto A (a), conjunto erodido por (b). Operação de erosão realizada no processador de imagens Imago/LMPT.

3.1.2- Dilatação

O dilatado de A por B , denotado $A \oplus B$, é o conjunto de todos os pontos x , de tal forma que o centro do elemento estruturante implantado tem uma intersecção não nula com A (veja-se ilustração na Figura 3.3), dado por

(3.2)

Na Figura 3.4.a, mostra-se uma imagem original e, na Figura 3.4.b, a imagem dilatada. Com a dilatação, os objetos da imagem original aumentam de tamanho, podendo haver a união de objetos inicialmente separados em razão do tamanho do elemento estruturante utilizado.

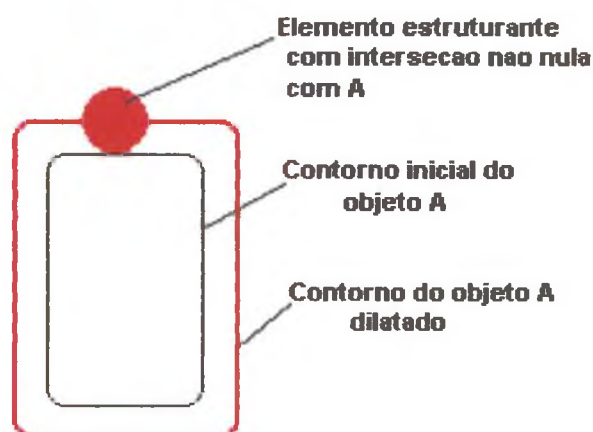
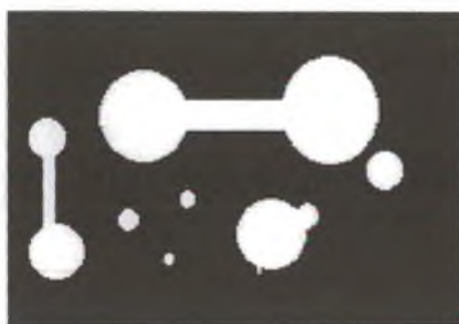
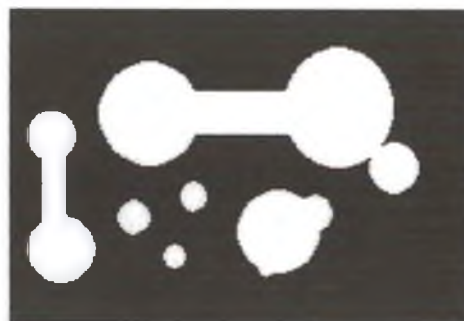


Figura 3.3: Ilustração da operação de dilatação.



(a)



(b)

Figura 3.4: Conjunto A (a), conjunto dilatado por (b). Operação de dilatação executada no processador de imagens Imago/LMPT.

3.2- Granulometria e operação de abertura

A granulometria é o estudo da distribuição de tamanho de objetos. A origem do termo vem da seguinte experiência (Coster et Chermant, 1989): tome-se um material, como, por exemplo, areia, com o fim de se determinar a distribuição de tamanho de grãos. Para tanto, faz-se passar uma amostra da areia por peneiras de tamanhos de malhas crescentes e mede-se a massa do conteúdo de areia retida em cada peneira. Cada peneira conterá os grãos de areia de tamanho superior ao de sua malha.

A análise granulométrica necessita de uma unidade de medida, que no caso anterior com peneiras, é a massa dos grãos; em análises de imagens, podem-se utilizar o comprimento, a área superficial ou o volume como unidade de medida.

Uma operação de abertura (erosão seguida de dilatação) com um elemento estruturante de tamanho D é análoga ao método descrito com uma peneira de malha de tamanho característico D . Determina-se a função distribuição de tamanho de poros realizando-se uma seqüência de operações de abertura sobre uma imagem bidimensional binária S , com um elemento estruturante de tamanho crescente. Nesse caso, a unidade de medida é a área superficial dos poros, e a função distribuição será dada por:

$$(3.3)$$

onde $\frac{A_d}{A}$ é a fração de poros de tamanho d menores ou iguais a D ; $\frac{A}{A_d}$ é a fração em área total dos poros (a porosidade da imagem S) e $\frac{A_{>D}}{A}$ é a fração de área de poros de tamanho superior a D , ou seja, os poros remanescentes após a abertura com o elemento de tamanho D , como descrito por Pieritz et alii (1993).

Este trabalho utiliza a operação de abertura para a determinação da distribuição de poros visando a uma análise comparativa com a determinação da distribuição obtida a partir do grafo da linha mediana. As operações de erosão e dilatação são classicamente realizadas, tendo-se o círculo (no espaço discreto) como elemento estruturante. Entretanto, dado que é fundamentado na distância euclidiana, a utilização do

círculo nos conduz à manipulação de números reais. O presente trabalho utiliza a operação de abertura implementada no software Imago, com elementos estruturantes baseados em métricas que fornecem valores inteiros de distância, denominadas *métricas de chanfro*, cujos valores aproximam-se bem dos valores euclidianos.

Além disso, classicamente, as operações de erosão e de dilatação são realizadas na imagem binária, o que requer testes entre os conjuntos elemento estruturante e imagem como definidos pelas equações (3.1) e (3.2). No software Imago, as operações são realizadas em uma imagem transformada da binária, a imagem de distância ao complementar (IDC), acarretando uma grande diminuição do número de operações envolvidas para a realização da erosão e da dilatação. De fato, a imagem binária contém apenas a informação sobre um dado pixel se pertence à fase poro ou sólida, enquanto que, na imagem de distância ao complementar, tem-se a informação da fase a que pertence o pixel e adicionalmente, sua distância mínima à fase complementar.

A seguir, são apresentados os conceitos básicos da geometria discreta, fundamentais para o trabalho com imagens digitais, definindo-se as métricas de chanfro utilizadas, denominadas d_{3-4} e d_{5-7-11} . Discorre-se ainda, com detalhes, sobre o conceito de imagem de distância ao complementar.

3.3 - Fundamentos de geometria discreta – métricas em Z^2

Para o processamento de imagens digitais, os conceitos da geometria clássica e da geometria Euclidiana são adaptados para serem manipulados em uma representação discreta e binária gerando os conceitos da chamada *geometria discreta*.

No espaço discreto, o conceito de vizinhança faz-se necessário. Para um dado pixel em Z^2 , podem-se ter 4-vizinhanças, formadas por quatro vizinhos chamados de *vizinhos diretos*, ou 8-vizinhanças, formadas por quatro vizinhos diretos e quatro *vizinhos indiretos* ou diagonais (veja-se Figura 3.5).



Figura 3.5: Representação das quatro vizinhanças e das oito vizinhanças.

Esse conceito de vizinhos de um pixel faz com que o caminho a ser percorrido entre dois pixels e para a geração de uma reta de conexão não se processe de maneira direta, mas em direções múltiplas de 45° . Em uma relação de quatro vizinhanças, uma reta diagonal processa-se como dentes de uma serra, visto na Figura 3.6, na qual o acréscimo de vizinhos indiretos (oito-vizinhanças) altera a configuração da reta, suavizando-a.

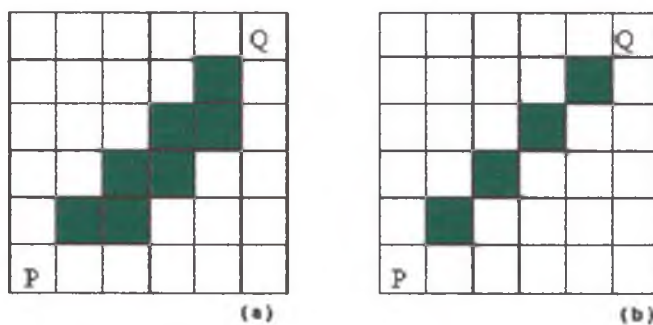


Figura 3.6: Diferentes configurações para a reta ligando dois pontos em função da relação de vizinhos. 4-vizinhanças (a) e 8-vizinhanças (b).

Considerando-se o espaço discreto Z^2 , as primeiras métricas que surgiram foram as chamadas *City-Block Distance* (métrica de quarteirão- d_4) e *Chessboard*

Distance (tabuleiro de xadrez- d_8). A distância entre dois pixels e e f em Z^2 , definidas por estas métricas, são dadas, respectivamente, por:

$$(3.4)$$

$$(3.5)$$

As propriedades respeitadas pelas métricas, para quaisquer pontos P , Q e R são:

- 1) positiva, $d(P, Q) \geq 0$ se e somente se $P = Q$;
- 2) simetria (comutatividade), $d(P, Q) = d(Q, P)$;
- 3) desigualdade triangular, $d(P, R) \leq d(P, Q) + d(Q, R)$.

As métricas d_4 e d_8 são as métricas de base para o espaço discreto Z^2 . De fato, essas métricas estão associadas com a noção de 4-vizinhança e 8-vizinhança, respectivamente.

Para a construção de algoritmos envolvendo cálculos de distância, que será visto a seguir, torna-se útil a definição de máscaras, representando as métricas. Na Figura 3.7, mostram-se as máscaras de base para as métricas d_4 e d_8 , observando-se que os valores de distância elementares para os vizinhos diretos (em d_4) e diretos e indiretos (em d_8), a que chamaremos de *ponderações locais*, são todos iguais a 1.

Figura 3.7: Ponderações para deslocamentos associados às métricas d_4 e d_8 .

O problema associado a essas métricas está no fato de que os valores de distância por elas fornecidos afastam-se bastante daqueles fornecidos pela distância Euclidiana, dada por:

$$(3.6)$$

Dessa forma, procura-se definir ponderações locais inteiras com valor aproximado da distância euclidiana. A seguir, apresentam-se duas dessas aproximações que conduzem à definição das métricas, ditas de *chanfro* d_{3-4} e d_{5-7-11} .

3.3.1- Distância de chanfro d_{3-4} e d_{5-7-11}

Como visto, para as métricas d_4 e d_8 , a cada deslocamento elementar associa-se uma ponderação 1, tendo-se deslocamentos apenas pelos vizinhos diretos na métrica d_4 e deslocamentos pelos vizinhos diretos e indiretos na métrica d_8 (Figuras 3.8.a,b).

Para máscaras de chanfro com dois parâmetros a e b , respectivamente a ponderação para os vizinhos diretos e indiretos, procura-se aproximar por frações b/a (Thiel, 1991; Chassery et Montanvert, 1991; Moschetto, 1991).

Uma ponderação bastante utilizada é $a = 3$ e $b = 4$, donde vem a aproximação: . Esta aproximação dá origem à métrica de chanfro d_{3-4} (Figura 3.8.e).

Chanfros envolvendo vizinhanças maiores (com parâmetros a , b e c) foram também propostos, como o , obtido a partir da aproximação , (Figura 3.8.f).

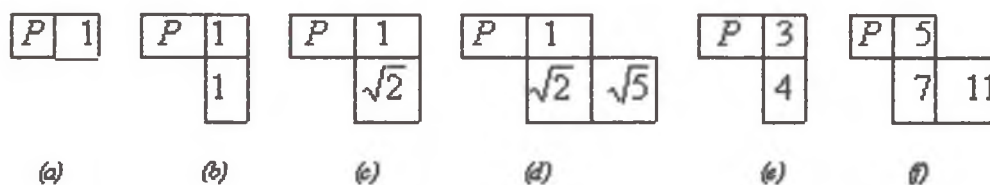


Figura 3.8: Ponderações locais (Thiel, 1991).

Na Figura 3.9, mostram-se as máscaras associadas às métricas de chanfro d_4 , d_8 , $d_{3,4}$ e $d_{5,7,11}$.

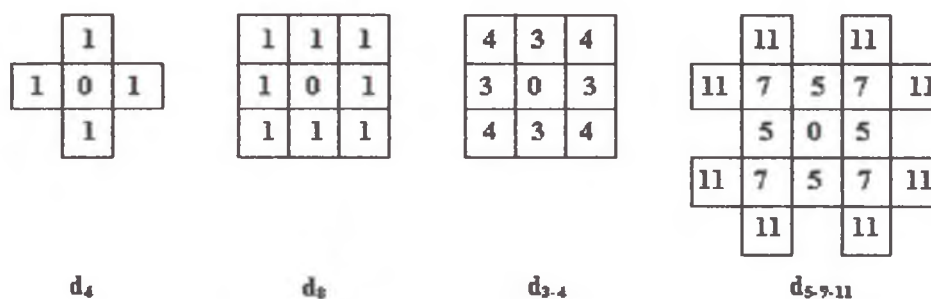


Figura 3.9: Máscaras de chanfro d_4 , d_8 , $d_{3,4}$, $d_{5,7,11}$ (centradas em 0).

Para essas métricas de chanfro, o cálculo da distância entre dois pixels e pode ser feito avaliando-se as distâncias de pixels intermediários a partir de , indo para . Começa-se por centrar a máscara em e fazem-se ponderações da máscara entre os vizinhos de . O valor que é obtido em um ponto X é gerado centrando-se a máscara em X e procurando o mínimo da soma de cada ponderação da máscara com o ponto intermediário ou posterior (Figura 3.10).

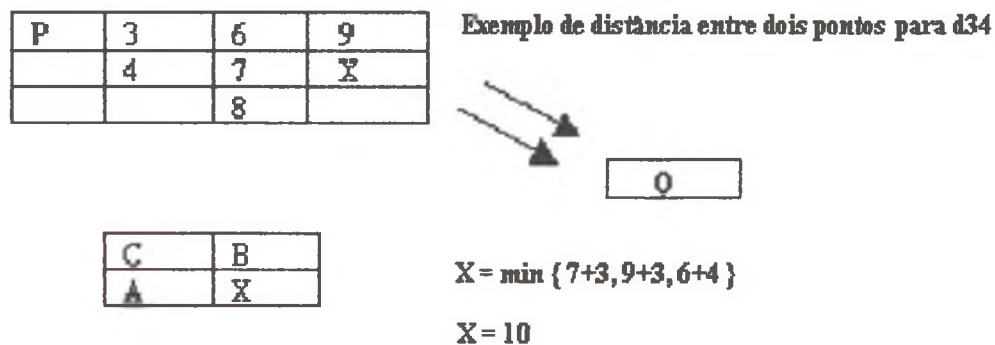


Figura 3.10: Esquema para cálculo da distância de chanfro entre dois pontos P e Q (Thiel, 1991).

3.3.2- Imagem de distância ao complementar (IDC)

Denomina-se *imagem de distância ao complementar* (IDC) àquela transformada da imagem binária, na qual, para cada pixel P da fase de interesse (em nosso caso os poros), é atribuída a distância mínima à fase complementar (em nosso caso, os sólidos), de acordo com a métrica utilizada. Os valores dos pixels da fase complementar não são alterados. A imagem binária contém apenas a informação sobre um dado pixel da imagem se é poro ou sólido. A IDC contém esta informação e, adicionalmente, a mínima distância dos pixels de uma fase à fase complementar.

Para a determinação da imagem de distância ao complementar, pode-se formular um algoritmo a partir das máscaras de chanfro. Para isso, faz-se a decomposição da máscara em duas semimáscaras sequenciais simétricas centradas em P . A IDC é obtida em duas varreduras: uma de percurso Avante e outra de percurso Para Trás. Na Figura 3.11, mostra-se o esquema para a obtenção de IDC, podendo-se observar a decomposição da máscara de chanfro $d_{3,4}$.

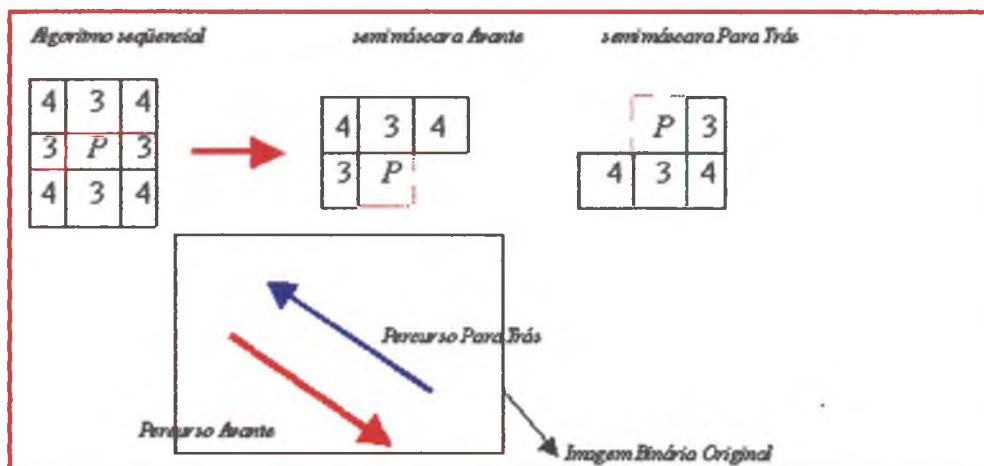


Figura 3.11: Esquema para algoritmo sequencial para obtenção de IDC com métrica $d_{3,4}$.

O algoritmo sequencial (Chassery e Montanvert, 1991; Thiel, 1991) para o cálculo de IDC com o chanfro $d_{3,4}$ é dado por:

1) Semimáscara de percurso Avante, que percorre a imagem de alto a baixo e da esquerda para a direita:

Para: $i = 1$ até N

$j = 1$ até M

(3.7)

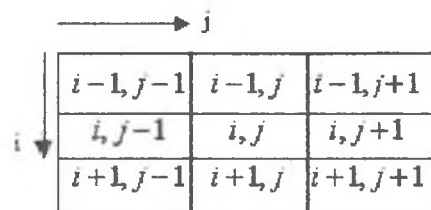
2) Semimáscara de percurso Para Trás, que percorre a imagem de baixo para cima e da direita para a esquerda:

Para: $i = N$ até 1

$j = M$ até 1

(3.8)

onde o tamanho da imagem é $(M \times N)$ e $I(i,j)$ é o valor de distância no pixel (i,j) da fase de interesse no cálculo da distância ao complementar. A máscara associada ao sistema de indexação de coordenadas é mostrada na Figura 3.12.



$i-1, j-1$	$i-1, j$	$i-1, j+1$
$i, j-1$	i, j	$i, j+1$
$i+1, j-1$	$i+1, j$	$i+1, j+1$

Figura 3.12: Máscara com centro em (i, j) .

Na Figura 3.13, mostra-se um exemplo numérico de obtenção da IDC, com as etapas de percurso Avante e percurso Para Trás, correspondente à IDC final.

0	0	0	0	0	0	0	0
0	3	3	3	3	3	3	0
0	3	6	6	6	6	4	0
0	3	6	9	9	8	4	0
0	3	6	9	8	4	0	0
0	0	0	3	6	4	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Percurso Avante (a)

0	0	0	0	0	0	0	0
0	3	3	3	3	3	3	0
0	3	6	6	6	6	3	0
0	3	6	7	7	4	3	0
0	3	3	4	6	3	0	0
0	0	0	3	3	3	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Percurso Para Trás (b)

Figura 3.13: Imagem de distância ao fundo com métrica $d_{3,4}$ em duas varreduras (Thiel 1991).

A representação da imagem de distância ao complementar, usando as métricas d_4 e d_8 para um mesmo objeto, é mostrada na Figura 3.14.

0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	2	2	2	2	1	0
0	1	2	3	3	2	1	0
0	1	1	2	2	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	2	2	2	2	1	0
0	1	2	2	2	2	1	0
0	1	1	2	2	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3.14: Representação da imagem de distância ao fundo usando métrica d_4 à esquerda e d_8 à direita, para o mesmo objeto (Montanvert, 1987).

3.4- Elementos estruturantes no espaço discreto com métrica d_{3-4}

Para a geração de um elemento estruturante, pode-se utilizar o algoritmo de imagem de distância ao complementar, considerando-se o espaço Z^2 , onde todos os pixels assumem o valor 1 exceto a origem posicionada em (0,0), que terá o valor nulo, representando o complemento.

Na Figura 3.15, o algoritmo de IDC foi aplicado em relação ao ponto (0,0), utilizando-se a métrica d_{3-4} , sendo apresentado, então, um mapa de distâncias em relação à origem (0,0). Tomando-se como exemplo uma bola de raio R igual a 4 centrada na origem (0,0), esta será formada pelos pixels de valores de distância à origem iguais a 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12.

Por outro lado, determinando-se os valores de distância ao complementar de bolas d_{3-4} , verifica-se que o valor de IDC do ponto central da bola corresponde a $3R+1$. Assim, em uma imagem qualquer de distância ao complementar, os pixels cujos valores de distância são menores ou iguais a $3R+1$ podem conter uma bola de raio R inclusa na fase de interesse. Para se calcular o raio R de uma bola inclusa na fase de interesse associada a um valor de IDC, escreve-se que , ou seja, que o raio pertence ao conjunto dos números inteiros. Como se está trabalhando em um espaço discreto,

valores de IDC diferentes pertencerão à mesma bola, em uma razão de 3 para métrica d_{3-4} . O raio será determinado por:

$$(3.9)$$

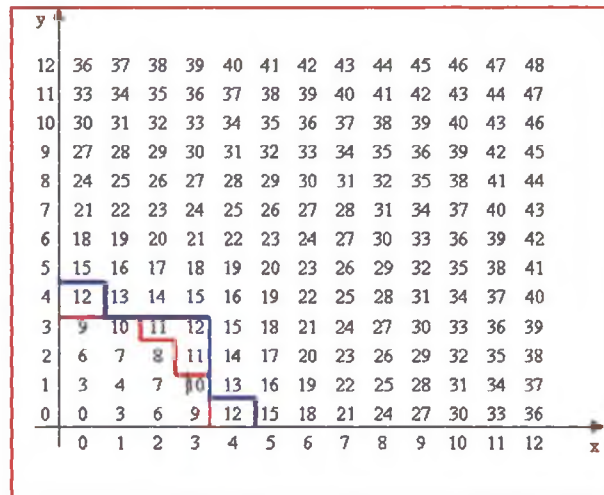


Figura 3.15: Representação esquemática de um quarto de uma bola com seus respectivos raios.

3.4.3 – Cálculo de distâncias. Erros associados às métricas de chanfro

Os erros associados à aproximação à distância Euclidiana com as métricas d_4 , d_8 , d_{3-4} e d_{5-7-11} , determinados por Montanvert (1987) e apresentados por Pieritz (1994), são descritos na Tabela 3.1, para o cálculo da distância dos pontos A , B e C em relação à origem no ponto P .

Tabela 3.1: Erros associados à aproximação discreta da distância Euclidiana.

	B	C
P	A	

	A	B	C
	0%	41,42%	34,16%
	0%	29,29%	10,56%
	0%	5,71%	4,29%
	0%	1,00%	1.34%

Na Figura 3.16, mostra-se a configuração dos elementos estruturantes gerados pelas diferentes métricas no espaço discreto, tendo-se um octógono para a métrica d_{3-4} e um hexadecágono para a métrica d_{5-7-11} . A utilização das métricas d_4 e d_8 conduz a elementos estruturantes com as configurações de losango e quadrado, respectivamente.



Figura 3.16: Diferentes configurações espaciais para a representação da circunferência em função da métrica usada.

3.4.4 – Determinação da distribuição com diferentes métricas

Utilizando-se o software Imago avaliou-se a influência da métrica na determinação da distribuição de tamanho de poros com a operação de abertura morfológica.

Nessa avaliação, foi utilizada uma imagem binária de um arenito berea codificado 318238 (veja-se a Figura 3.17). Compararam-se os resultados obtidos para a distribuição de poros para essa imagem, considerando-se os elementos estruturantes gerados pelas métricas Euclidiana d_{3-4} e d_{5-7-11} .



Figura 3.17: Imagem utilizada para a verificação da influência da métrica na obtenção da distribuição de poros com a operação de abertura.

Os resultados mostrados no gráfico da Figura 3.18 revelam uma boa concordância das distribuições de poros obtidas com as métricas d_{3-4} e d_{5-7-11} em relação à métrica Euclidiana. Desta forma, a operação de abertura com a métrica d_{3-4} é a usualmente

adotada em razão de sua maior simplicidade de implementação computacional e a maior rapidez de cálculo.

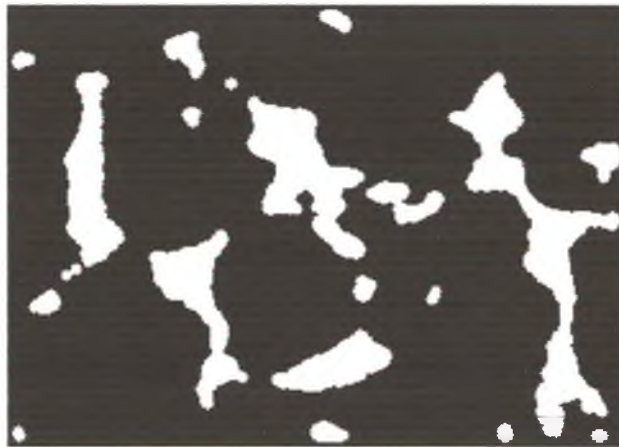
Figura 3.18: Influência da métrica na obtenção da distribuição de poros.

3.5- Interpretação da distribuição de poros obtida com operação de abertura

O modo de partição da fase poro, tal como realizada com a operação de abertura descrita no presente capítulo, considera como poros de pequenos diâmetros, regiões como protuberâncias e rugosidades dos poros. Este efeito pode ser observado na Figura 3.19: em (a) tem-se a imagem original e em (b) a imagem após a realização da operação de abertura. Como será visto nos capítulos seguintes, na caracterização com o grafo da linha mediana, considera-se uma cavidade com suas protuberâncias e rugosidades como um objeto único, computando-se a área do objeto para a determinação de um raio equivalente ao do círculo de mesma área do objeto. Assim, em relação ao grafo da linha mediana, a operação de abertura tende a superestimar as áreas associadas a objetos pequenos.



(a)



(b)

Figura 3.19: Uma imagem original (a) com a fase branca submetida a uma operação de abertura (b).

CAPÍTULO IV

LINHA MEDIANA 2D

Este capítulo trata da obtenção da linha mediana em imagens binárias bidimensionais, onde se está interessado na fase poro. Em torno de cada pixel da fase poro, pode-se gerar uma bola, de acordo com uma métrica especificada, com o maior raio de forma que a bola não intersecte a fase complementar, o sólido. Associa-se, assim, para todos os pixels da fase poro, a bola de maior raio, que não intersecta a fase sólida. Um pixel é dito um *centro máximo* se a maior bola a ele associada não estiver completamente incluída em nenhuma das outras bolas. Denomina-se de *eixo mediano* ao conjunto de pixels que são centros máximos. Assim, gerando-se as bolas de maior raio nos pixels do eixo mediano, tem-se um completo recobrimento, uma pavimentação da fase poro. O conhecimento das coordenadas espaciais e do raio de bola associada dos pixels do eixo mediano permite a reconstrução da imagem binária. Dessa forma, o eixo mediano é uma codificação equivalente à imagem binária.

Contudo, o eixo mediano da fase poro de uma imagem geralmente não é completamente conectado. Para fins de análise da morfologia e da topologia da imagem, constrói-se, então, a chamada *linha mediana* que consiste nos pontos do eixo mediano acrescida de pontos de conexão, representativa da imagem considerada (veja-se um esboço na Figura 4.1). A linha mediana é contínua e reversível no sentido que permite a reconstrução da imagem dado que ela contém o eixo mediano.

No presente trabalho, utiliza-se, para a determinação da linha mediana, um algoritmo proposto por Di Baja (1991), o qual é baseado na métrica $d_{3,4}$. A

seguir são apresentados os conceitos matemáticos necessários para a determinação da linha mediana.

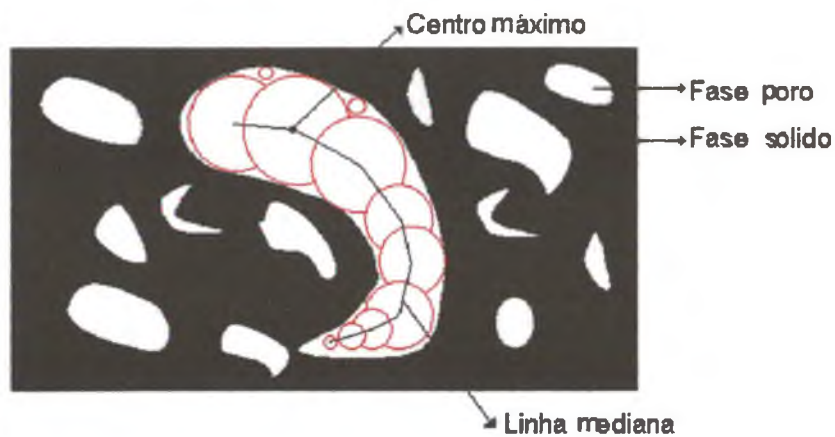


Figura 4.1: Esboço da linha mediana de uma imagem bidimensional.

4.1- Eixo mediano

Considere-se uma imagem binária, como, por exemplo, a mostrada na Figura 4.2, com a fase sólida em preto e os poros em branco. Na Figura 4.3, é mostrada a matriz numérica associada a esta imagem, onde os poros assumem o valor unitário e os sólidos, o valor nulo.



Figura 4.2: Imagem em preto (sólido) e branco (poro).

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.3: Matriz numérica associada à imagem da Figura 4.2

A partir da imagem binária e considerando-se a métrica $d_{3,4}$, constrói-se para a fase poro a imagem de distância ao complementar (IDC), como exposto na seção 3.3.2, que é mostrada na Figura 4.4.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	6	6	4	3	0
0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	6	8	8	6	3	0
0	0	3	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	3	6	9	9	6	3	0
0	3	4	7	8	7	3	0	0	0	0	0	0	3	6	9	9	6	3	0
0	3	6	7	10	7	4	3	3	3	3	3	3	4	7	10	9	6	3	0
0	3	6	9	11	8	7	6	6	6	6	6	6	7	8	11	9	6	3	0
0	3	6	9	11	8	7	6	6	6	6	6	6	7	8	11	9	6	3	0
0	3	4	7	8	7	4	3	3	3	3	3	3	4	7	10	9	6	3	0
0	0	3	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	3	6	9	9	6	3	0
0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	6	8	8	6	3	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	6	6	4	3	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.4: Imagem de distância ao complemento (IDC) com métrica $d_{3,4}$.

Um pixel P pertencente à fase poro será um centro máximo se o seu valor de imagem de distância ao complementar (IDC) for maior que o valor de IDC de todos os pixels 8-vizinhos (seção 3.3.1), diminuídos das respectivas ponderações u dadas pela métrica, assim expresso matematicamente (Chassery e Montanvert, 1991):

Para $P \in IDC$

P será centro máximo ,

se e somente se $\forall Q$ 8-vizinho de P ,

$$T_P > T_Q - u ,$$

$$u = \begin{cases} 3, & \text{se } P \text{ e } Q \text{ forem vizinhos diretos;} \\ 4, & \text{se } P \text{ e } Q \text{ forem vizinhos diagonais.} \end{cases} \quad (4.1)$$

onde T_P e T_Q designam a distância transformada (valor IDC do ponto) de P e Q , respectivamente.

Contudo, a utilização direta da Equação (4.1) em uma imagem de distância ao complementar construída, tendo-se como base a métrica $d_{3,4}$, conduz à definição de pseudocentros máximos, que são redundantes uma vez que não são necessários para a reconstrução da imagem. Esses pseudocentros máximos ocorrem em função de se estar utilizando a métrica $d_{3,4}$, não ocorrendo quando se utiliza a definição da equação (4.1) tendo-se por base as métricas d_4 e d_8 .

Para contornar esse problema associado à métrica $d_{3,4}$, Arcelli (1984) propôs a utilização de uma tabela de correspondência nos valores de IDC, denominada de Tabela de Arcelli. De acordo com a Tabela de Arcelli, os pixels da imagem com valor de IDC iguais a 3 corresponderão ao valor 1 e os de valor iguais a 6 terão o correspondente igual a 5.

Na Figura 4.5.a, mostra-se um segmento de imagem binária com a fase de interesse com valor 1, tendo-se omitido todo o complemento valor 0 e sua correspondente IDC na Figura 4.5.b. Pela aplicação da equação (4.1) na IDC, têm-se como centros máximos os pontos de valor igual a 3, em amarelo, e o ponto de valor 6, em vermelho. Contudo, para a reconstrução da imagem, é necessária apenas a utilização do centro máximo de valor 6. O uso da Tabela de Arcelli antes da aplicação da equação (4.1) elimina os pseudocentros máximos de valor igual a 3 (Figura 4.5.c).

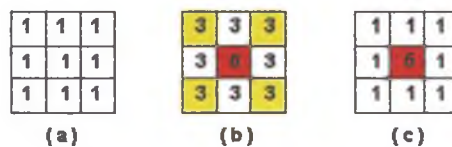


Figura 4.5: Imagem binária (a). Imagem de distância ao complemento com a métrica $d_{3,4}$ e os centros máximos (b). Imagem com centro máximo após uso da tabela de correspondência de Arcelli (c).

A Figura 4.6 exibe a utilização da tabela de correspondência de Arcelli para a imagem de distância ao complemento da Figura 4.4.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	5	5	4	1
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	8	8	5	1
0	0	1	4	5	4	1	0	0	0	0	0	0	0	1	5	9	9	5	1
0	1	4	7	8	7	1	0	0	0	0	0	0	0	1	5	9	9	5	1
0	1	5	7	10	7	4	1	1	1	1	1	1	1	4	7	10	9	5	1
0	1	5	9	11	8	7	5	5	5	5	5	5	5	7	8	11	9	5	1
0	1	5	9	11	8	7	5	5	5	5	5	5	5	7	8	11	9	5	1
0	1	4	7	8	7	4	1	1	1	1	1	1	1	4	7	10	9	5	1
0	0	1	4	5	4	1	0	0	0	0	0	0	0	1	5	9	9	5	1
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	8	8	5	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	5	5	4	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.6: Imagem de distância ao complementar usando a Tabela de Arcelli.

O conjunto dos pixels de máximos locais constitui o eixo mediano, como é mostrado na Figura 4.7, sem o uso da tabela de correspondência, e, na Figura 4.8, com o uso da tabela de Arcelli.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	6	6	4
0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	8	8	6	3
0	0	3	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	0	3	6	8	8	6	3
0	3	4	6	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	3	6	8	8	6	3
0	3	6	8	10	7	4	3	3	3	3	3	3	4	7	10	9	6	3	0
0	3	6	8	10	8	7	6	6	6	6	6	6	7	8	11	9	6	3	0
0	3	6	8	10	8	7	6	6	6	6	6	6	7	8	11	9	6	3	0
0	3	4	7	8	7	4	3	3	3	3	3	3	4	7	10	9	6	3	0
0	0	3	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	0	3	6	8	8	6	3
0	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	8	8	6	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	6	6	4	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.7: Imagem com pixels de pseudocentros máximos (em amarelo) sem uso da tabela de Arcelli.



Figura 4.8: Imagem com os pixels caracterizados como centros máximos (em vermelho), constituindo o eixo mediano, utilizando a tabela de correspondência de Arcelli.

Na reconstituição da imagem a partir do eixo mediano, é importante salientar que se deve usar a tabela de correspondência de Arcelli de forma inversa.

4.2- Extração da linha mediana

Partindo-se da determinação do eixo mediano, precisa-se garantir a conexão entre os centros máximos para que se obtenha uma linha contínua. Di Baja (1991) propõe que se faça uma *deteccção paralela de pixels* para que se determinem os pixels-celas, que não são centros máximos, mas que são importantes para se obter uma linha contínua. Faz-se, ainda, uma *deteccção sequencial de pixels* ou *gradiente*, que identifica as conexões entre os pixels (do eixo mediano e os pixels-celas) através de um incremento crescente ao longo da trajetória.

4.2.1- Deteccção paralela de pixels – pixels-celas

Como visto na seção 3.3.1, a 8-vizinhança de uma dado pixel P é composta pelos quatro vizinhos diretos e os quatro vizinhos indiretos (diagonais). Para o presente tratamento, denomina-se esta vizinhança por $N(P)$ e adota-se a seguinte convenção para os pixels vizinhos (veja-se a Figura 4.9): os vizinhos diretos, ou vizinhos ímpares, são denotados por n_1 , n_3 , n_5 e n_7 ; os vizinhos indiretos ou pares por n_2 , n_4 , n_6 e n_8 .

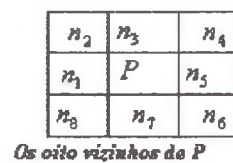


Figura 4.9: Convenção adotada para a vizinhança $N(P)$ de um dado pixel P .

Chassery et Montanvert (1991) apresentam a definição de *caminho conectado*. A conexão dos pontos P e Q será possível se, e somente se, P_i for adjacente de P_{i-1} para $1 \leq i \leq n$, onde $P = P_0, P_1, P_2, \dots, P_n = Q$ é uma seqüência de vizinhos, nessa ordem.

Para uma rede quadrada, podem-se conectar dois pontos P e Q , associando-se a 8-vizinhança $N(P)$ do pixel P . Quando os dois pontos P e Q se conectarem só com vizinhos diretos (4-vizinhos), será dito *caminho 4-conectado* (Figura 4.10.a). No entanto quando os pontos P e Q se conectarem a partir de vizinhos diretos e indiretos (8-vizinhos), este será dito *caminho 8-conectado* (Figura 4.10.b).

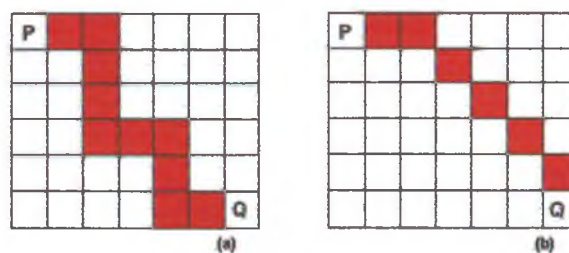


Figura 4.10: Caminhos 4-conectado (a) e 8-conectado (b) para uma malha quadrada.

Para uma malha quadrada, em função do caminho conectado utilizado, são definidos os *componentes 4-conectados* (associado ao caminho 4-conectado) ou *componentes 8-conectados* (associado ao caminho 8-conectado) (veja-se Figura 4.11).

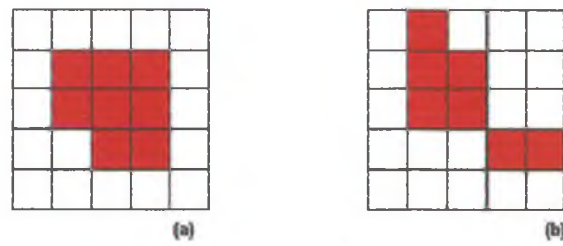


Figura 4.11: Componentes 4-conectado (a) e 8-conectado (b)

Os denominados *pixels-cela* são localizados normalmente nos estreitamentos (gargantas). No caso da métrica $d_{3,4}$, o grupo de detecção paralela é quase completamente esgotado pelos centros máximos. Segundo Di Baja (1991), um pixel P será um pixel-cela quando não for um centro máximo e quando se verificar, pelo menos, uma das seguintes condições:

- i) na vizinhança $N(P)$, existe mais de um componente 8-conectado de pixels rotulados maiores que o valor da imagem de distância ao complementar de P (veja-se exemplo na Figura 4.12.a);
- ii) na vizinhança $N(P)$, existe um ou mais componentes 4-conectados de pixels menores que o valor da imagem de distância ao complementar de P (Figura 4.12.b);
- iii) na vizinhança $N(P)$, existe um triplo de consecutivos vizinhos de P (vizinho-ímpar/vizinho- par/vizinho- ímpar) que são rotulados 3 (Figura 4.12.c).

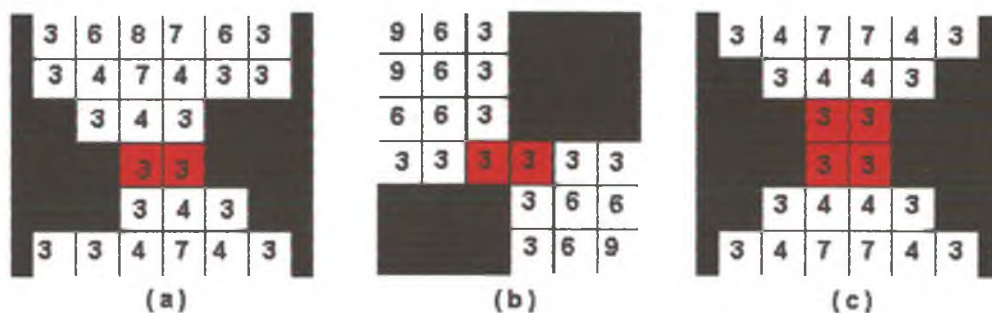


Figura 4.12: Exemplos de pixels-celas (em vermelho) que ocorrem nos estrangulamentos.

4.2.2- Detecção sequencial de pixels – gradiente

A detecção sequencial de pixels da linha mediana é identificada por crescente incremento ao longo da trajetória, partindo de alguns pixels já marcados (eixo mediano e pixels-celas). Para esse propósito, quando um pixel é marcado, o rastro examinado é interrompido para checar se a trajetória conectada pode ser crescente.

Os pixels nos quais os valores máximos do gradiente são positivos serão marcados na linha mediana. O primeiro pixel na trajetória é o (não-marcado), vizinho n_k de um pixel marcado P , como $n_k > P$, e o gradiente de Q em relação a P é máximo. O gradiente é computado por:

$$grad(n_k) = \frac{1}{w_m}(n_k - P) \quad (4.4)$$

onde $w_m = 3$, se k for ímpar, e $w_m = 4$ se k , for par.

Duas trajetórias desconexas crescentes se originarão do mesmo pixel, ou seja, faz-se gradiente em duas direções somente quando este é *pixel-cela*. O vizinho maximiza o gradiente tendo sido classificado em dois componentes, e duas trajetórias ao longo das etapas gradiente serão crescentes. O gradiente será considerado em mais de uma direção quando estiver centrado em um pixel com valor 3 ou 4.

Mostra-se, na Figura 4.14, um exemplo de procedimento para obtenção do gradiente:

- i) o pixel rotulado 14 (já conhecido) é um centro máximo ou *pixel-cela*;
- ii) compara-se com a vizinhança (n_k) e verifica-se a condição se $n_k > P$;
- iii) testa-se, através da Equação 4.4, qual é o máximo gradiente (pixel rotulado 16);
- iv) o que for máximo é o próximo a ser analisado (pixel rotulado 16).

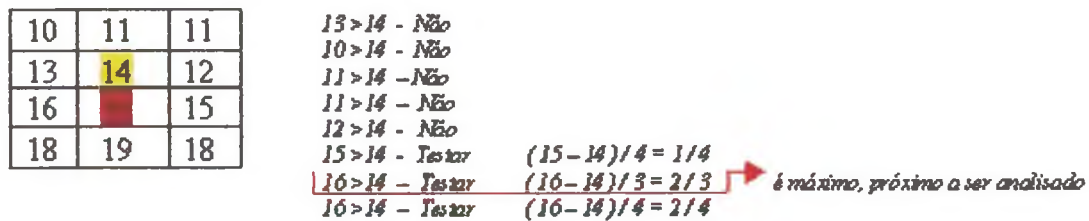


Figura 4.14: Esquema- exemplo para obtenção do gradiente.

A linha mediana contínua representativa do objeto da imagem da Figura 4.2, com todos os pontos e que reconstitui totalmente o objeto, é mostrada na Figura 4.15.

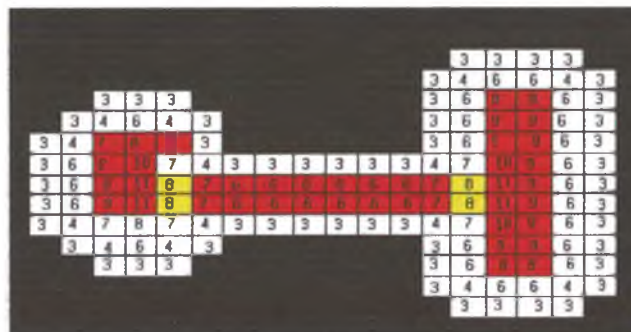


Figura 4.15: Imagem com a linha mediana da imagem da Figura 4. 2. Em amarelo, estão representados os pixels de conexão e, em vermelho, os pixels do eixo mediano.

4.3- Afinamento da linha mediana

A linha mediana, como mostrado na Figura 4.15, é contínua, contudo não é unitária no sentido que ela tem uma espessura de mais de um pixel.

Para facilitar a análise geométrica, procura-se uma redução da coleção dos pixels formadores da linha mediana em uma linha contínua e unitária, fazendo-se a eliminação de pixels, mas de forma a conservar a topologia da imagem.

De acordo com Di Baja (1991), um pixel P da linha mediana, para que seja eliminado, deve satisfazer ambas as condições a seguir:

- i) existe, pelo menos, um vizinho- ímpar de P não marcado;
- ii) existe, pelo menos, um triplo de vizinhos n_k , n_{k+2} , n_{k+5} (k é ímpar, adição do módulo 8), onde n_k e n_{k+2} são marcados, enquanto n_{k+5} é não-marcado.

A condição (i) previne a criação de buracos na coleção da linha mediana, ao passo que a condição (ii) previne o encurtamento dos ramos.

A linha mediana, após eliminação dos pixels desnecessários para manter a conexão tornando a linha contínua e unitária, é mostrada na Figura 4.16, que é representativa da imagem da Figura 4.2.

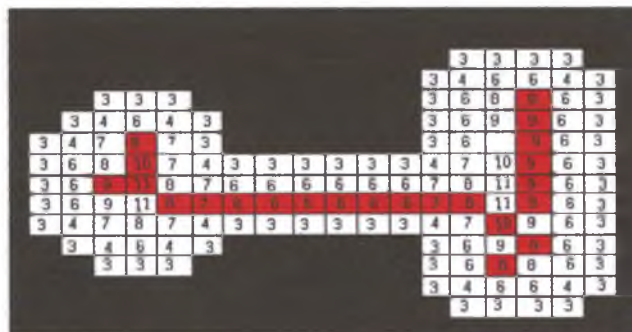


Figura 4.16: Imagem com a linha mediana afinada contínua e unitária.

CAPÍTULO V

DISTRIBUIÇÃO DE POROS - GRAFO DA LINHA MEDIANA 2D

No presente capítulo objetiva-se a determinação da distribuição de tamanho de poros de imagens bidimensionais a partir das informações contidas na linha mediana como determinada no capítulo anterior. Como dito no capítulo introdutório deste trabalho, a fase poro pode ser considerada como composta de cavidades (sítios) e estreitamentos (ligações)(veja-se Figura 5.1).

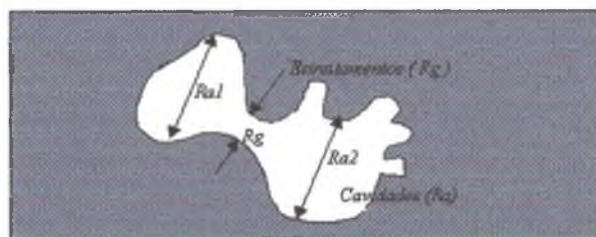


Figura 5.1: Esboço representando raios dos estreitamentos R_g e das cavidades R_a .

Uma região da fase poro será caracterizada como estreitamento quando estiver localizada entre, pelo menos, duas cavidades (de raio $Ra1$ e $Ra2$) cujos raios sejam maiores do que o raio do estreitamento (raio igual a Rg), ou seja, $Rg < Ra1$ e $Rg < Ra2$.

Com as informações da linha mediana, pode-se construir um *grafo*, ou diagrama, consistindo em um esquema de dados capaz de descrever a geometria da

fase poro em regiões de sítios e ligações. Utilizando as informações deste diagrama pode-se obter a distribuição de tamanhos de poros total (sítios + ligações), ou separadamente, em uma distribuição de tamanhos de sítios e outra de ligações. Como visto no capítulo II, a determinação da distribuição de poros através da operação de abertura morfológica fornece a distribuição de poros total, não distinguindo as regiões da fase poro em sítios e ligações. A discretização da fase poro de imagens bidimensionais em regiões de sítios e ligações, aqui determinada pela linha mediana, permite uma melhor compreensão da geometria da estrutura porosa, importante para a concepção de modelos tridimensionais da estrutura, bem como para a simulação de processos de invasão de fluidos.

A seguir, são apresentados os procedimentos utilizados para a caracterização das distribuições de sítios e ligações, sendo o método resultante aplicado em imagens contendo formas geométricas conhecidas, geradas em um editor comercial. Os resultados da distribuição de poros total (sítios + ligações) obtidos com o presente método são comparados com os resultados obtidos com a morfologia matemática, procedendo-se a uma análise acerca de seus comportamentos.

5.1-Caracterização das bolas

A caracterização das bolas consiste na determinação dos pixels da linha mediana associados às bolas maiores e menores, que representam os principais elementos formadores dos objetos da imagem (Pieritz, 1994). Para essa determinação, uma máscara (3 x 3) é centrada em cada pixel pertencente à linha mediana, tomando-se o seu valor de imagem de distância ao complementar (IDC). O pixel em análise é caracterizado como uma bola maior (bola menor) se o seu valor de IDC for maior ou igual (menor ou igual) aos valores de IDC dos pixels na 8-vizinhança e também pertencentes à linha mediana.

Assim, as bolas maiores e as bolas menores são determinadas pelas equações :

bola maior

$$IDC(x,y) \geq IDC(x+i,y+j) \quad (5.1)$$

onde $IDC(x,y)$ designa o valor de distância ao complementar do pixel pertencente à linha mediana em análise (x,y) e $i \in \{-1,+1\}$ e $j \in \{-1,+1\}$, desde que sejam pixels também pertencentes à linha mediana.

bola menor

$$IDC(x,y) \leq IDC(x+i,y+j) \quad (5.2)$$

5.2- Rotulação dos grupos

Nesta etapa, caracteriza-se cada pixel da linha mediana afinada: o que for bola menor ou maior permanece com o rótulo da IDC; os demais pixels passarão a ter um valor correspondente igual a 1, mantendo-se a conexão entre os pixels da linha mediana, como é mostrado na Figura 5.2.

Os pixels rotulados igual a 1 serão utilizados posteriormente para a rotulação dos grupos, pois indicarão o caminho que deverá seguir a linha mediana até encontrar um pixel que esteja rotulado diferente de 1.

Pixels pertencentes à linha mediana que não são bolas menores e nem bolas maiores, mas que estejam conectados em mais de dois vizinhos (bifurcação), serão considerados partes dos respectivos grupos. Se o pixel for único, formará um grupo unitário e será avaliado como tal.

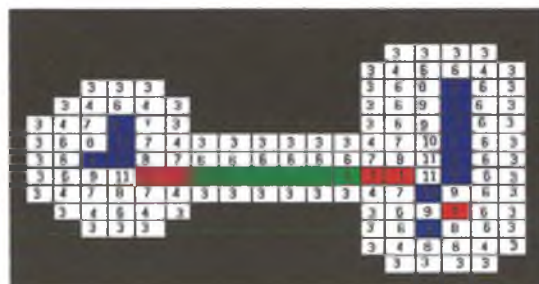


Figura 5.2: Imagem com os grupos de pixels que representam os grupos-sítios (azul) e grupo-ligações (verde).

5.3 – Caracterização dos grupos-sítios e grupos-ligações

Determinados os conjuntos de pixels que formam os grupos, passa-se a classificá-los em grupos-sítios e grupos-ligações.

Estabelece-se um peso para cada grupo, que é igual à média aritmética do conjunto de pixels que formam o grupo. Para a imagem da Figura 5.2, veja-se a Tabela 5.1.

Um grupo-sítio será caracterizado se o grupo analisado possuir dois grupos vizinhos ou mais, sendo que um dos grupos vizinhos possui um peso menor do que o grupo analisado. Caracteriza-se um grupo-sítio se o grupo analisado possuir somente um grupo vizinho.

Um grupo-ligação caracteriza-se quando o grupo analisado possuir dois grupos vizinhos ou mais, sendo que todos os grupos vizinhos possuem um peso maior do que o grupo analisado. Serão considerados, ainda, como grupo-ligações todos os grupos analisados que tiverem mais de dois grupos vizinhos e o peso do grupo analisado for 3 e/ou 4.

Estabelece-se um fator de forma (de 0% a 100%, a critério do analisador) que dirá quanto deve ser maior o peso do grupo analisado em relação aos seus grupos vizinhos para que seja um grupo-ligação. Quanto menor for o fator de forma, maior será o número de ligações.

$$PesoGrupoAnalisado \leq (PesoGrupoVizinho) \times (FatorForma) \quad (5.3)$$

Observa-se, no esquema da Figura 5.3, que os grupos G1, G3, G4, G5, G7, G8 e G9 são identificados como grupos-sítios e os grupos G2 e G6, como grupos-ligações. Esses verificam a equação 5.3, os quais estão representados no exemplo da figura analisada. Nela supõe-se que:

Se:

$G1, G3, G4, G5 \geq G2$, $G2$ é um grupo-ligação;

Se:

$G5 \text{ e } G7 \geq G6$, $G6$ é um grupo-ligação;

Se:

$G6, G8 \text{ e } G9 \leq G7$, $G7$ é um grupo-sítio.

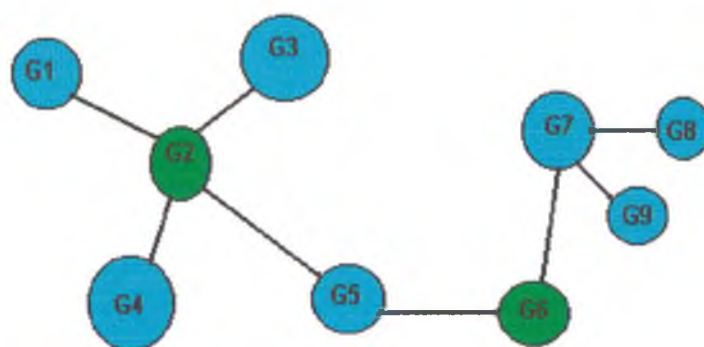


Figura 5.3: Esquema para caracterização dos grupos-sítios (azul) e grupos-ligações (verde).

5.4 – Caracterização dos objetos-sítios e objetos-ligações

Para caracterizar os objetos-sítios, estabelece-se que os grupos-sítios que estiverem conectados entre si formarão um único objeto-sítio. Na Figura 5.3, $G7$, $G8$ e $G9$ formarão um único objeto-sítio. O objeto-ligação será caracterizada de maneira análoga à do objeto-sítio. A contribuição em área de cada sítio ou ligação será computada a partir disso. Veja-se a Tabela 5.2 para o exemplo da Figura 5.4.

Tabela 5.1: Dados dos grupos de acordo com a imagem das Figuras 5.2 e 5.4.

Grupos com IDF e coordenadas	Conexão dos Grupos	Pesos dos Grupos	Sítios (1) Ligações (0)	Áreas
1 15: 2: 8 15: 3: 9 15: 4: 9 15: 5: 9 15: 6: 9 15: 7: 9 14: 8: 10	1: 3 1: 4 2: 3 3: 2 3: 1 4: 1	1: 9 2: 9.5 3: 6 4: 8	1: 1 2: 1 3: 0 4: 1	1 : 144 (total) 2 : 0 (perda) 3 : 114 (sítio) 4 : 30 (ligação)
2 3: 4: 8 3: 5: 10 2: 6: 9 3: 6: 11				
3 6: 7: 6 7: 7: 6 8: 7: 6 9: 7: 6 10: 7: 6 11: 7: 6				
4 14: 10: 8				

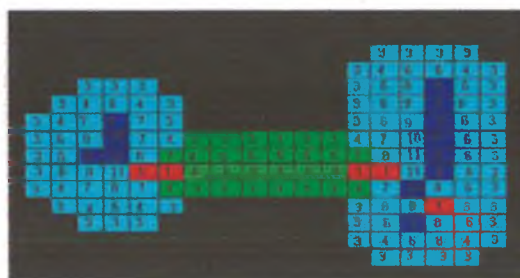


Figura 5.4: Imagem com os objetos-sítios (área em azul) , objetos-ligações (área em verde).

Tabela 5.2: Dados dos objetos-sítios e objetos-ligações de acordo com a imagem da Figura 5.4.

Área dos Objetos-Sítios e Ligações	Área dos Objetos-Sítios e Ligações
Objetos-Sítios	Sítios:
1:	
Grupo 1	1: 71
Grupo 4	
2:	2: 43
Grupo 2	
Objetos-Ligações:	Ligações:
1:	1: 30
Grupo 3	

5.5- Linha-limite e pintura dos sítios e ligações

As ligações serão pintadas a partir de uma linha-limite perpendicular à linha mediana localizada no vizinho do último pixel da ligação. Esta linha será determinada como mostra a Figura 5.5.

A determinação da inclinação da linha-limite (m_2), perpendicular à inclinação da linha mediana (m_1), será dada por

$$m_1 = \tan \theta = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (5.4)$$

$$m_2 = -\frac{1}{m_1} \quad (5.5)$$

Serão três os pixels que estarão distantes do último pixel da ligação quando a imagem de distância ao complementar for menor de 15, e a linha-limite estará localizada na posição do último pixel da ligação.

Para pixels com imagem de distância ao complementar maior do que 15, o número de pixels distantes do vizinho do último pixel da ligação será o valor inteiro da IDC dividido por 5, e a linha-limite estará localizada na posição do vizinho do último pixel da ligação.

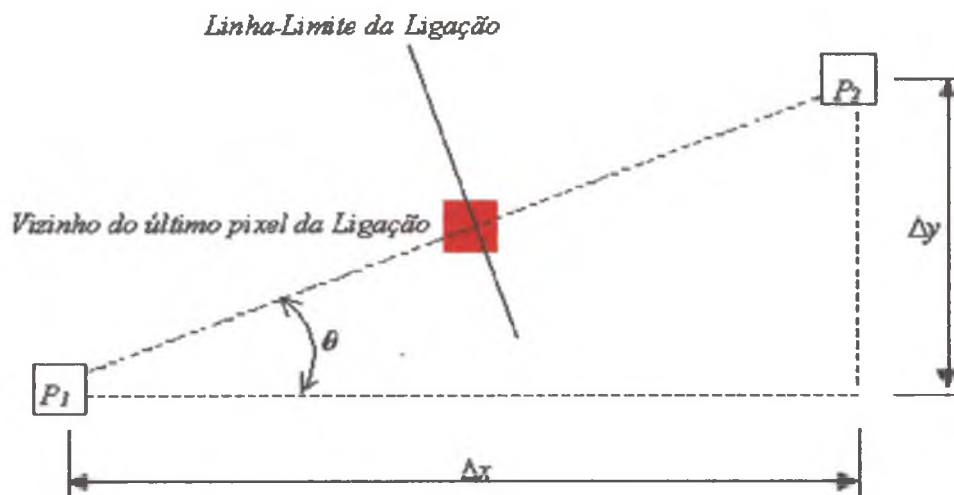


Figura 5.5: Esquema para obtenção da linha-limite da ligação.

Para ligações que tiverem somente um pixel, a regra para obtenção da linha-limite é a mesma, porém a linha perpendicular estará sobre o próprio pixel que representa a ligação. Quando se encontrar uma bifurcação (com mais de dois vizinhos), este será o pixel verificado como o da posição para a determinação da inclinação (θ) da reta.

A pintura dos sítios far-se-á a partir dos grupos de pixels que representam os objetos-sítios e do raio determinado até a linha-limite aos grupos que representam as ligações.

5.6- Determinação dos diâmetros dos sítios e ligações

Os diâmetros dos sítios e ligações são associados à área de circunferências e retângulos (em Z^2) e ao volume de esferas e cilindros (em Z^3), respectivamente (Figura 5.6).

Para a determinação do raio (R) da ligação em pixels, utiliza-se a equação 3.9, descrita no capítulo III. O diâmetro da ligação ($2R$) está associado ao pixel pertencente ao objeto-ligação de maior IDC. Dado que se conhece a área e o raio da ligação, pode-se calcular o comprimento L da ligação a partir de:

$$AreaObjetoLigação = 2R \times L \quad (5.6)$$

O diâmetro do objeto-sítio será determinado a partir da área associada ao objeto-sítio, é dado por:

$$AreaObjetoSitio = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (5.7)$$

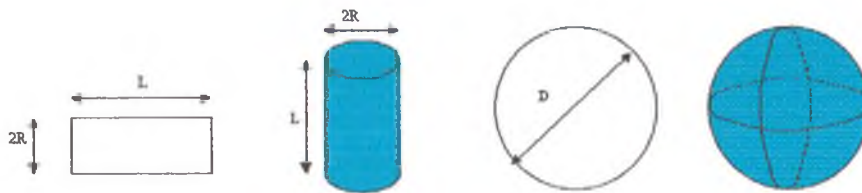


Figura 5.6: Figuras geométricas regulares; retângulos e circunferências (Z^2) e cilindros e esferas (Z^3).

Para a avaliação de uma imagem obtida a partir de um microscópio ótico, deve-se associar o tamanho do pixel a sua escala real.

Tabela 5.3: Dados dos diâmetros de objetos-sítios e objetos-ligações de acordo com a Figura 5.4.

Diâmetros objetos-ligações	Diâmetros objetos-sítios
Ligação 1: $D_{mc} = 6$	Sítio 1: $D = 10$
	Sítio 2: $D = 6$

5.7- Avaliação de imagens

Apresentam-se, a seguir, duas imagens geradas por um editor gráfico comercial: uma imagem composta de objetos retangulares e outra de objetos elipsoidais. O algoritmo desenvolvido neste trabalho, como descrito anteriormente, foi incorporado ao software Imago, sendo aplicado nessas imagens para a determinação das distribuições de tamanhos de sítios e ligações. Para fins de comparação, procedeu-se também à determinação da distribuição de poros total (sítio + ligações) com a ferramenta de abertura morfológica disponível no Imago.

5.7.1- Imagem gerada a partir de retângulos

Na Figura 5.7.b, apresenta-se a linha mediana afinada para a imagem gerada pelo editor gráfico a partir de retângulos (Figura 5.7.a). Mostra-se, na Figura 5.8.a, os pixels da linha mediana caracterizados como grupos que representam os sítios (em azul) e os pixels que representam os grupos de ligações (em verde). As áreas associadas às ligações são representadas na Figura 5.8.b (em verde). E, finalmente, na Figura 5.9, mostra-se uma imagem com as áreas pertencentes aos sítios e às ligações relativas à imagem da Figura 5.7.a.

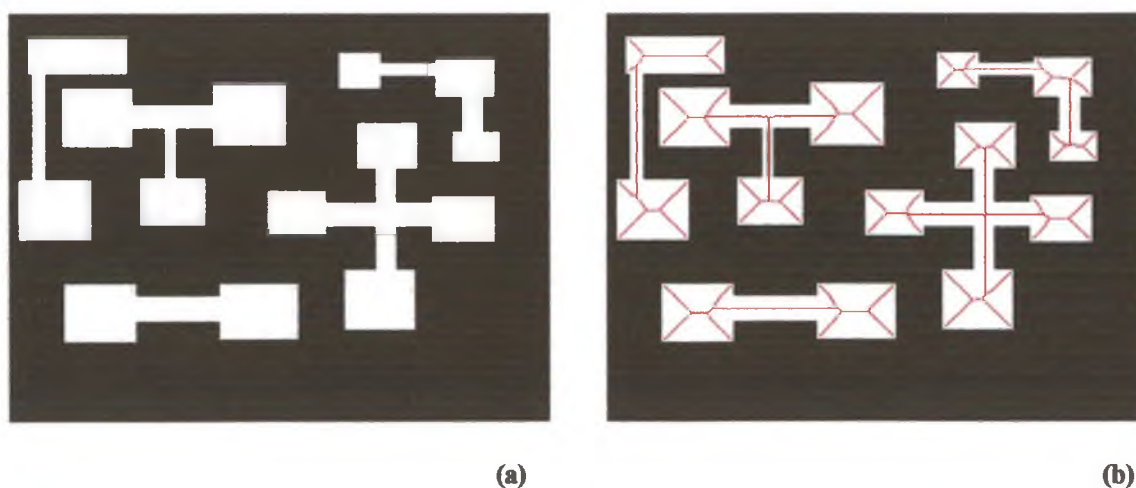


Figura 5.7: Imagem binária produzida por um editor gráfico (a) e sua linha mediana (b).

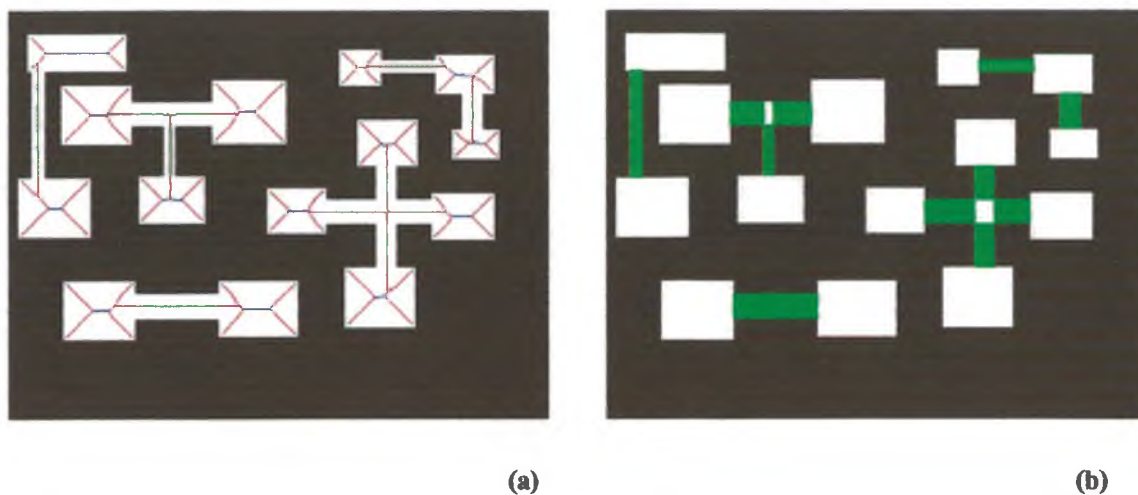


Figura 5.8: Imagem mostrando os grupos da Figura 5.7.a, os que representam os sítios em azul e as ligações em verde (a). As ligações pintadas (b).

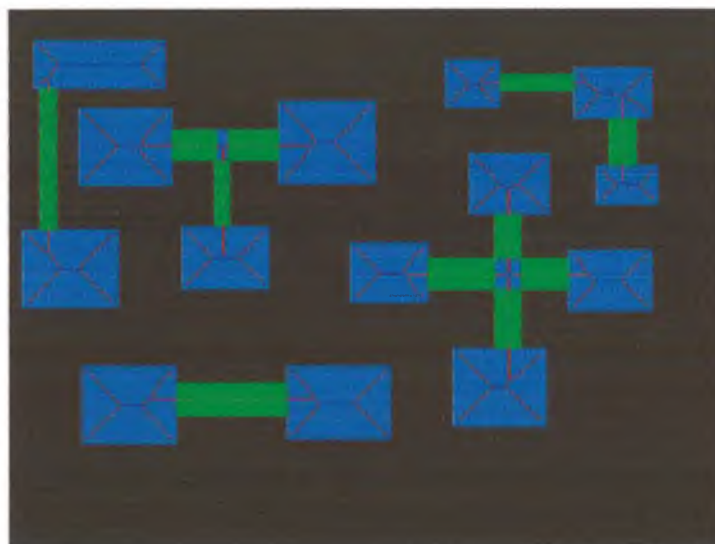
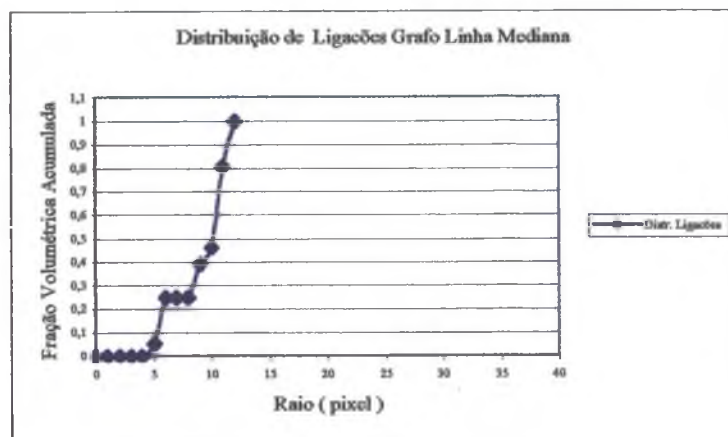


Figura 5.9: Imagem mostrando os sítios (área azul) e as ligações (área verde) da Figura 5.7.a.

A função distribuição de tamanhos de poros obtida a partir do grafo da linha mediana, que faz a caracterização geométrica das ligações e dos sítios separadamente para a Figura 5.7.a, é mostrada nos gráficos das Figuras 5.10.a e 5.10.b, respectivamente.



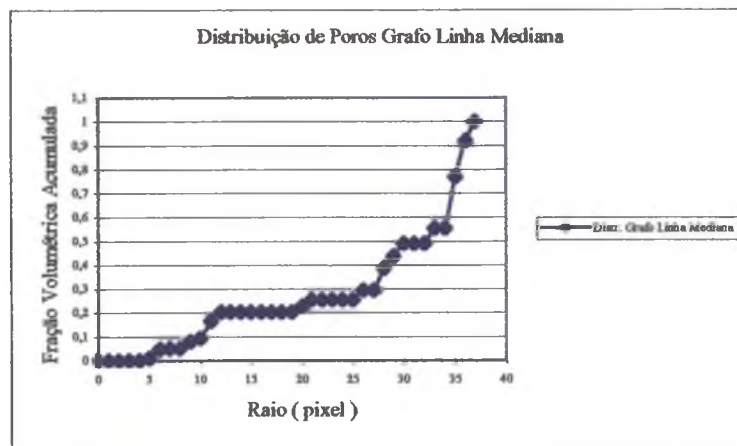
(a)



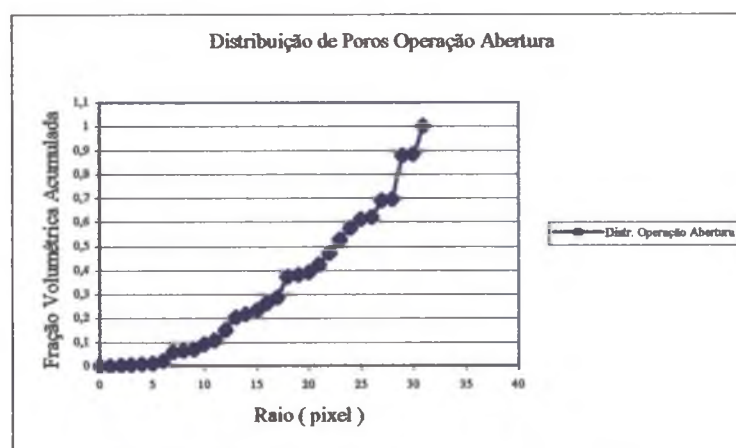
(b)

Figura 5.10: Gráficos da função distribuição de ligações (a) e sítios (b) da Figura 5.7.a.

A função distribuição de tamanhos de poros total (sítios + ligações) para a imagem da Figura 5.7.a determinada pela técnica do grafo da linha mediana, é mostrada no gráfico da Figura 5.11.a, e a função distribuição de poros obtida pela técnica da operação de abertura é representada no gráfico da Figura 5.11.b.



(a)



(b)

Figura 5.11: Gráficos das funções distribuição de poros pelas técnicas do grafo da linha mediana (a) e operação abertura (b) da Figura 5.7.a.

O gráfico que representa a comparação entre as funções distribuição de poros pelas técnicas do grafo da linha mediana e da operação de abertura é mostrado na Figura 5.12.

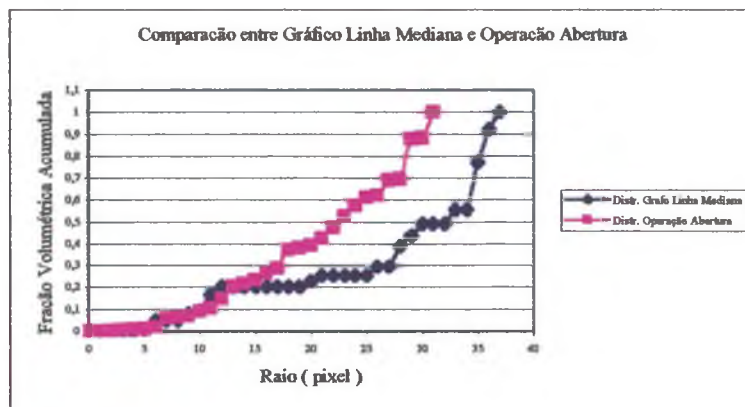


Figura 5.12: Gráfico de comparação das funções distribuições de poros peias técnicas do grafo da linha mediana e operação abertura da Figura 5.7.a.

A imagem gerada pelo editor gráfico a partir de retângulos possui uma porosidade igual a aproximadamente 0,27 e o seu tamanho é de (515 x 390) pixels. A área correspondente à fase poro é de 54183 pixels. A área correspondente aos sítios é de 43662, e a área correspondente às ligações é de 10521; a área dos sítios e ligações é de 54183. O fator de forma utilizado foi 5%.

Observa-se a diferença entre os diâmetros máximos: 31 pixels para a operação de abertura e 37 pixels para o grafo da linha mediana. Essa diferença deve-se ao fato de a determinação do diâmetro dos poros pelo grafo da linha mediana ser realizada a partir de objetos distintos e a operação de abertura superestimar pequenos poros nos cantos dos retângulos.

5.7.2- Imagem gerada a partir de elipsóides

Apresenta-se a linha mediana afinada na Figura 5.13.b, de uma imagem que foi gerada pelo editor gráfico a partir de elipsóides, exibida na Figura 5.13.a. Mostram-se, na Figura 5.14.a, os pixels da linha mediana caracterizados como grupos que representam os sítios (em azul) e os pixels que representam os grupos de ligações (em verde). As áreas das ligações, em verde, são representadas na Figura

5.14.b, e, finalmente, na Figura 5.15, mostra-se uma imagem com a área pertencente aos sítios (em azul) e as ligações (em verde) da Figura 5.13.a.

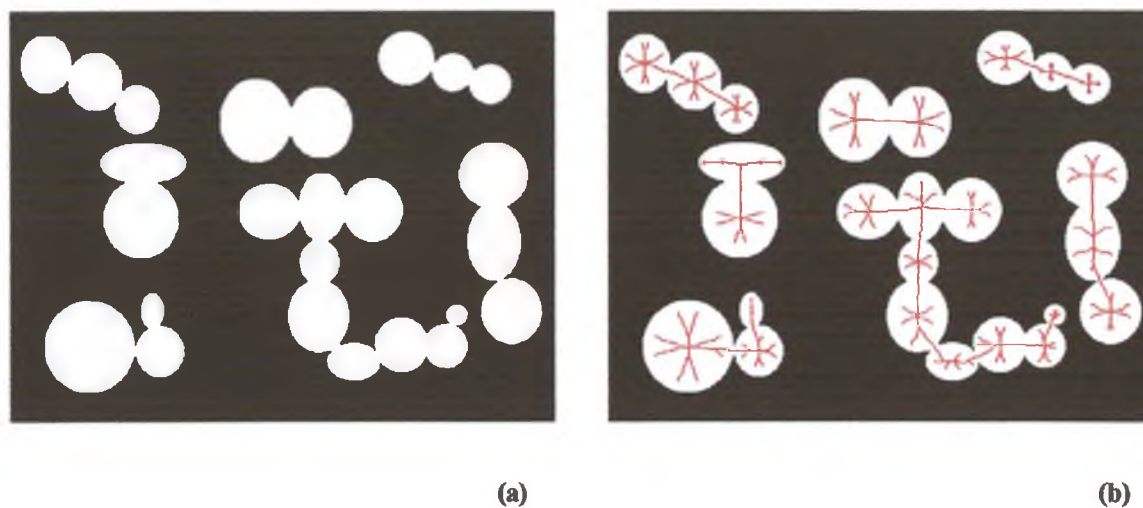


Figura 5.13: Imagem binária produzida por um editor gráfico (a) e sua linha mediana (b).

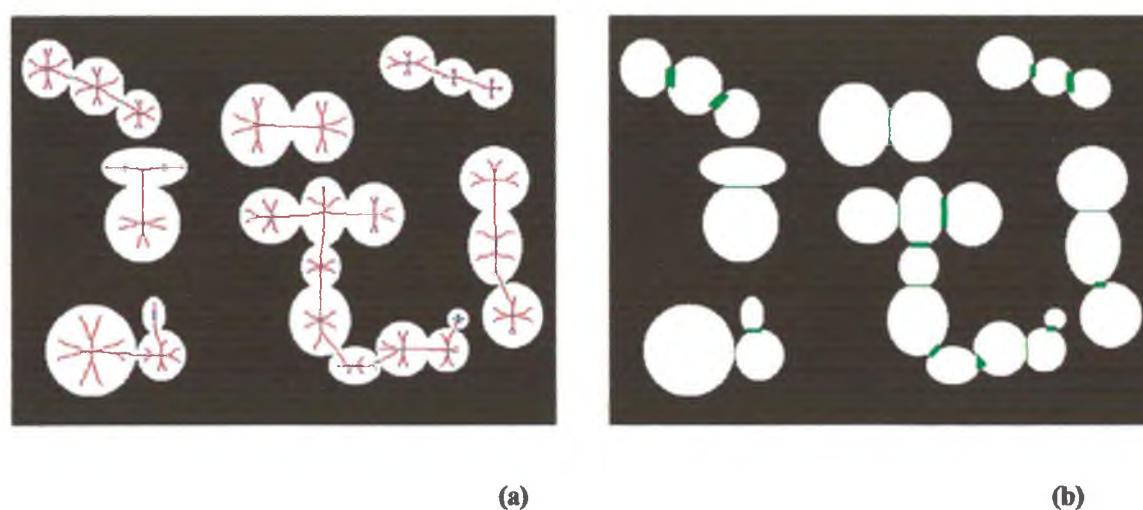


Figura 5.14: Imagem mostrando os grupos que representam os sítios (em azul) e as ligações (em verde) (a); as áreas de ligações (em verde) (b) da Figura 5.13.a.

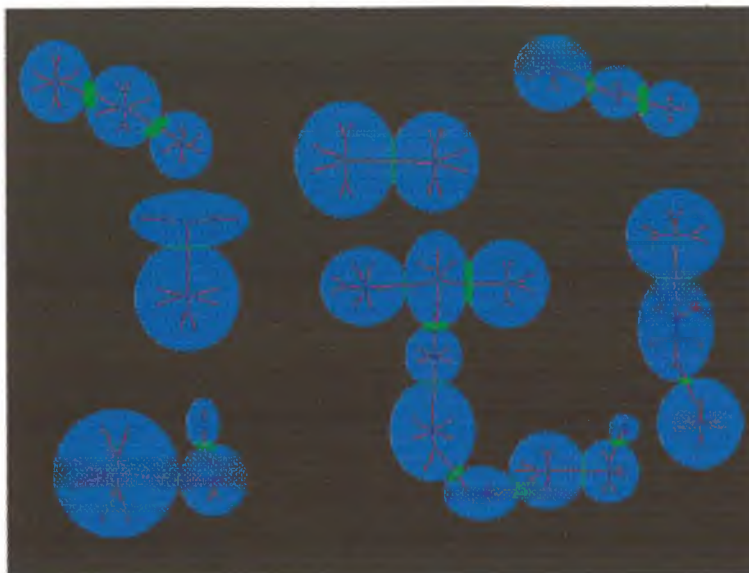
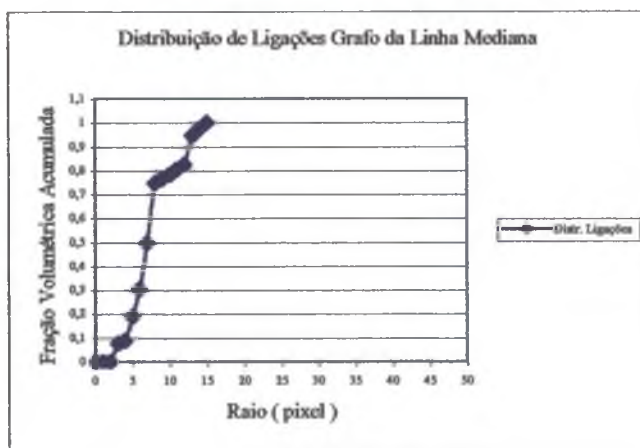
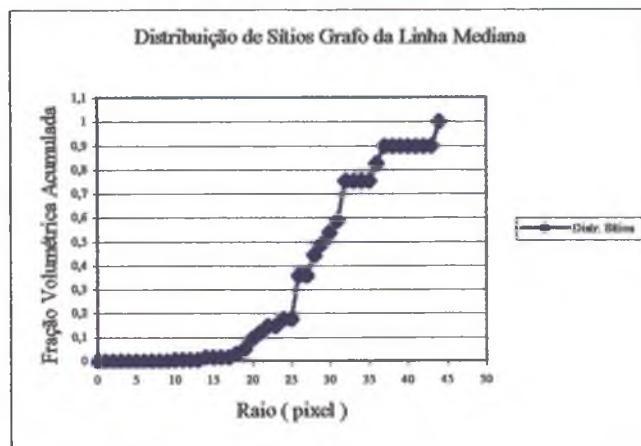


Figura 5.15: Imagem mostrando os sítios (área azul) e as ligações (área verde) da Figura 5.13.a.

A função distribuição de tamanhos de poros obtida a partir do grafo da linha mediana, que faz a caracterização geométrica das ligações e dos sítios separadamente para a Figura 5.13.a, é mostrada nos gráficos das Figuras 5.16.a e 5.16.b, respectivamente.



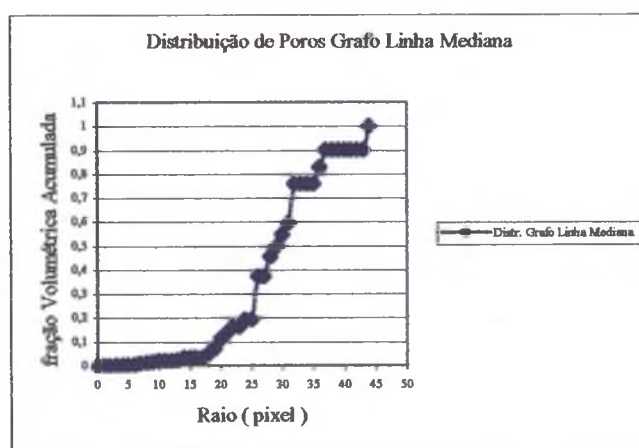
(a)



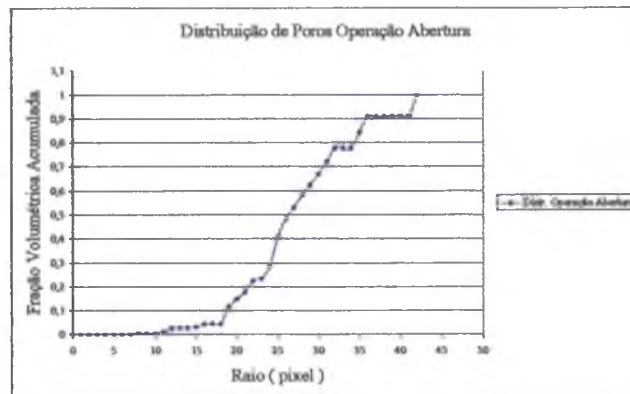
(b)

Figura 5.16: Gráficos da função distribuição de ligações (a) e sítios (b) da Figura 5.13.a.

A função distribuição de poros total (sítios + ligações) para a imagem da Figura 5.13.a, obtida pela técnica do grafo da linha mediana, é mostrada no gráfico da Figura 5.17.a. A função distribuição de poros obtida pela técnica da operação de abertura é representada no gráfico da Figura 5.17.b.



(a)



(b)

Figura 5.17: Gráficos das funções distribuição acumulada de poros pelas técnicas da linha mediana (a) e operação abertura (b) da Figura 5.13.a.

O gráfico que representa a comparação entre as funções distribuição de poros obtidas pelas técnicas do grafo da linha mediana e pela operação de abertura é mostrado na Figura 5.18.

A imagem gerada pelo editor gráfico a partir de círculos possui uma porosidade igual a, aproximadamente, 0,30 e o seu tamanho é de (515 x 390) pixels; a área correspondente à fase poro é de 60570 pixels. A área correspondente aos sítios é de 59390, e a área correspondente às ligações é de 1180. O fator de forma utilizado é 4%.

As curvas estão quase-coincidentes, ou seja, possuem quase a mesma inclinação. Observa-se que os diâmetros máximos são próximos: 42 pixels para a operação de abertura e 44 pixels para o da linha mediana. A proximidade entre os diâmetros deve-se ao fato de a figura ter sido gerada a partir de círculos; nesse caso, tanto os objetos avaliados pelo grafo da linha mediana quanto as bolas do elemento estruturante usado pela operação de abertura são quase-coincidentes.

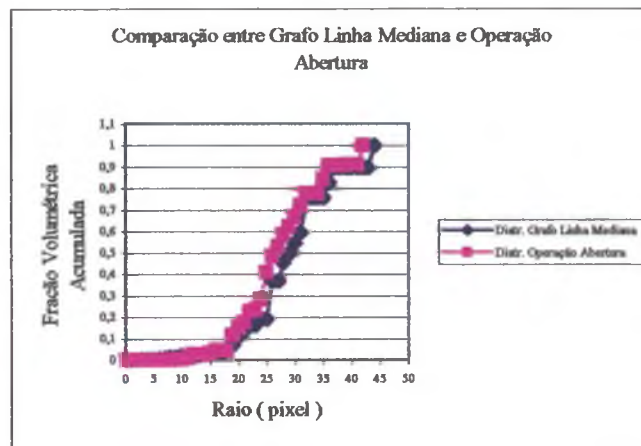


Figura 5.18: Gráfico de comparação das funções distribuição de poros obtidas pelas técnicas da linha mediana e operação abertura da Figura 5.13.a.

Observa-se que, nos casos analisados das Figuras.5.7.a e 5.13.a, enquanto, na primeira, gerada a partir de retângulos, as curvas estão distantes e as inclinações diferentes, na outra, gerada a partir de circunferências, as curvas são quase-coincidentes. Isso se deve ao modo como é computada a área de contribuição dos sítios das duas técnicas: enquanto, na operação de abertura, é feita a partir do elemento estruturante que é uma circunferência cujo raio é o raio desta circunferência; pela técnica do grafo da linha mediana, o raio é avaliado a partir dos sítios-objetos, em que a área é a soma dos pixels pertencentes aos sítios-objetos.

A operação de abertura atribui poros de pequenos diâmetros aos cantos dos retângulos, superestimando a contribuição desses sobre a distribuição de tamanhos de poros. A distribuição de poros pela técnica do grafo da linha mediana elimina esse problema, caracterizando os poros como objetos distintos.

O grafo da linha mediana mantém a informação de conexão entre os sítios e ligações e separa a distribuição de poros em uma distribuição de sítios e uma distribuição de ligações.

CAPÍTULO VI

LINHA MEDIANA 3D

Para a obtenção da linha mediana de estruturas porosas tridimensionais, desenvolveu-se, no presente trabalho, um algoritmo análogo ao de determinação da linha mediana de estruturas bidimensionais. As etapas envolvidas na determinação da linha mediana 3D são mostradas na Figura 6.1.

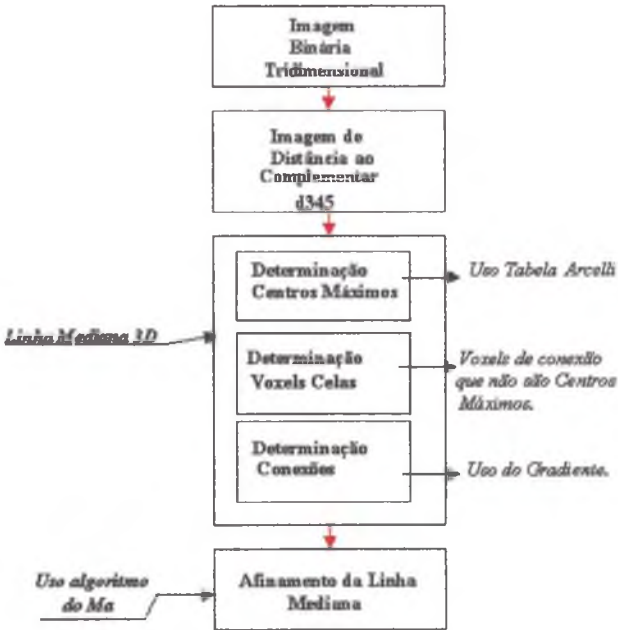


Figura 6.1: Esquema para obtenção da linha mediana 3D.

A seguir, são descritas cada uma das etapas de adaptações ao algoritmo de Di Baja (1991) para espaços tridimensionais.

6.1- Espaço discreto tridimensional. Métrica d_{3-4-5}

Para a avaliação de distâncias no espaço discreto tridimensional, utilizou-se a métrica de chanfro d_{3-4-5} , uma extensão da métrica d_{3-4} , como visto na seção 3.3.1. Uma célula elementar P do espaço discreto 3-D, denominada de *voxel*, possui uma vizinhança $M(P)$ composta de 26 vizinhos: 6 vizinhos de face, 12 vizinhos de aresta e 8 vizinhos de vértice. As distâncias Euclidianas dessas vizinhanças em relação ao voxel considerado são, respectivamente, 1, $\sqrt{2}$ e $\sqrt{3}$. Na métrica d_{3-4-5} , aproxima-se $\sqrt{2}$ por 4/3 e $\sqrt{3}$ por 5/3.

Assim, considerando-se essa métrica (veja-se Figura 6.2), a ponderação para os voxels de face comum é $d_f = 3$. A ponderação para os voxels de aresta comum é $d_a = 4$ e para os voxels de vértice comum é $d_v = 5$.

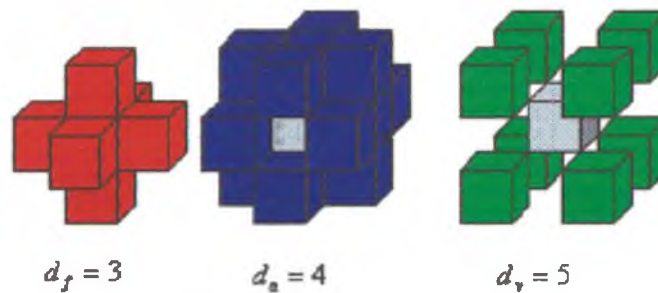


Figura 6.2: Ponderações locais para um voxel utilizando a métrica d_{3-4-5} (respectivamente, para faces, arestas e vértices comuns).

6.1.1- Determinação da imagem de distância ao complementar (IDC)

O algoritmo para a determinação da IDC em imagens binárias tridimensionais é análogo ao algoritmo seqüencial apresentado na seção 3.3.2 para imagens bidimensionais. A máscara 3D, associada à métrica d_{3-4-5} , é decomposta em duas semimáscaras simétricas: uma semimáscara de percurso Avante e uma semimáscara de percurso Para Trás (Magnani, 1996; Pieritz, 1998). Na Figura 6.3, mostram-se as semimáscaras bem como um esquema dos percursos.

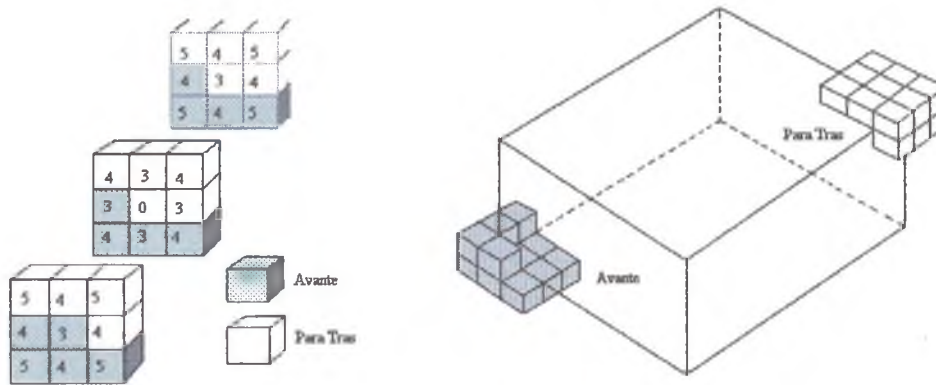


Figura 6.3: Máscaras seqüenciais para a métrica d_{3-4-5} , percurso Avante e percurso Para Trás.

O algoritmo de percurso Avante percorre a imagem de cima para baixo, da esquerda para a direita e da frente para o fundo, sendo que o valor de distância ao complementar de um voxel da fase de interesse na posição (x,y,z) será dado por:

$$I(x, y, z) = \min \{ I(x + x_i, y + y_i, z + z_i) + w_i \} \quad (6.1)$$

onde x_i , y_i e z_i são os voxels associados à semimáscara de percurso Avante e as ponderações w_i são dadas por

$$w_i = \begin{cases} df = 3, & \text{se vizinho de face;} \\ da = 4, & \text{se vizinho de aresta;} \\ dv = 5, & \text{se vizinho de vértice.} \end{cases} \quad (6.2)$$

O algoritmo de percurso Para Trás percorre a imagem de baixo para cima, da direita para a esquerda e do fundo para frente, modificando o valor de distância ao complementar da seguinte maneira:

$$I(x, y, z) = \min \{ I(x, y, z), I(x + x_i, y + y_i, z + z_i) + w_i \} \quad (6.3)$$

onde x_i , y_i e z_i são os voxels associados à semimáscara de percurso Para Trás.

Os valores associados aos voxels da fase complementar são mantidos inalterados e iguais a zero.

Exibem-se, na Figura 6.4, algumas das 26 posições dos voxels vizinhos a um voxel na posição (x, y, z) .

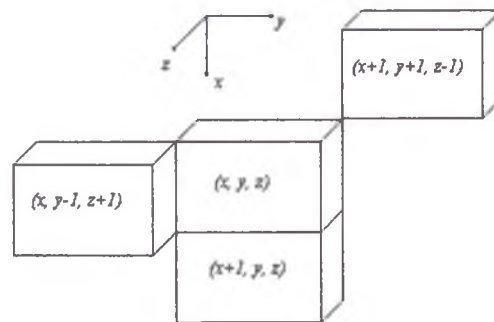


Figura 6.4 : Algumas das 26 posições da vizinhança de um voxel.

6.2- Determinação dos centros máximos

Um voxel P será um máximo local se o seu valor de distância ao complementar for maior que o valor de distância ao complementar de todos os voxels Q 26-vizinhos de P diminuído da ponderação w , assim expresso matematicamente:

Para $P \in IDC$

P será centro máximo,

Se e somente se $\forall Q$ 26-vizinho de P ,

$$T_P > T_Q - w,$$

$$w = \begin{cases} a = 3, & \text{se são vizinhos de face;} \\ b = 4, & \text{se são vizinhos de vértice;} \\ c = 5, & \text{se são vizinhos de aresta;} \end{cases} \quad (6.4)$$

onde T_P e T_Q designam o valor de distância ao complementar de P e Q , respectivamente.

Os pseudomáximos locais são eliminados pelo uso da tabela de correspondência de Arcelli, como visto no capítulo IV.

6.3- Determinação dos voxels-celas

Os voxels-celas são voxels importantes para a conexão da linha mediana e que não são centros máximos. Um voxel-cela é determinado quando se verifica uma das seguintes condições:

i)na vizinhança $N(P)$, como descrito na seção 4.2.1, existe mais de um componente 8-conectado ao ponto P , com voxels rotulados maiores que o valor da imagem de distância ao complementar de P (Figura 6.5);

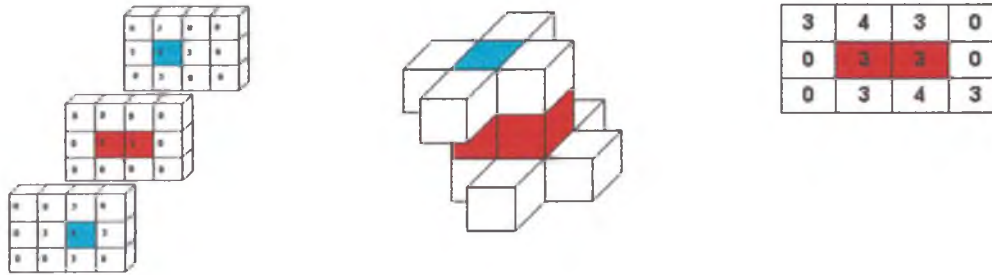


Figura 6.5: Exemplo de componente 8-conectado de voxels rotulados mais que P .

ii)na vizinhança $N(P)$, existe um ou mais componente 4-conectado ao ponto P com voxels menores que o valor da imagem de distância ao complementar de P (Figura 6.6);

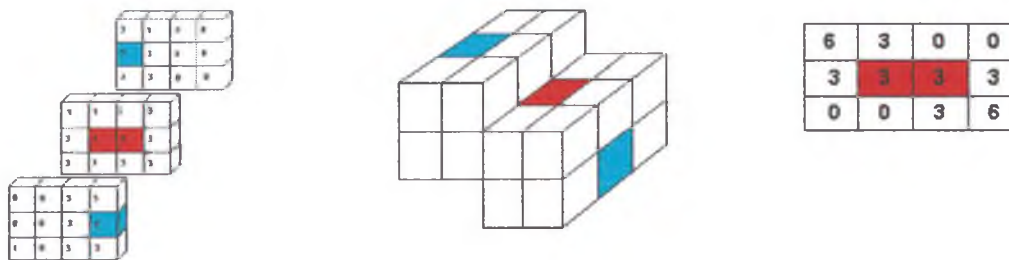


Figura 6.6: Exemplo de componente 4-conectado de voxels rotulados menores que P .

iii) na vizinhança $N(P)$, existe um triplo de consecutivos vizinhos de P (vizinho-face/vizinho-aresta/vizinho-face) que são rotulados 3 (Figura 6.7).

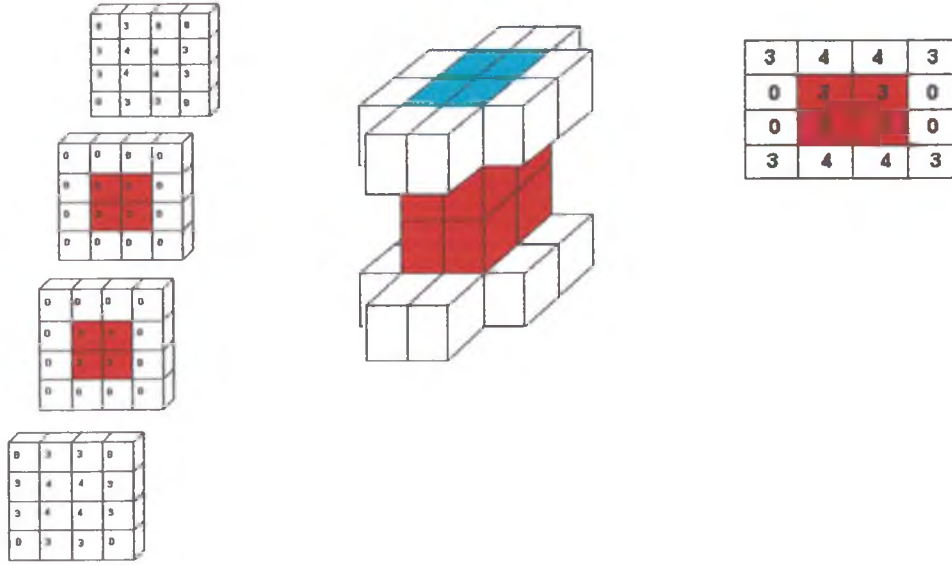


Figura 6.7: Exemplo de triplo de consecutivos vizinhos de P que são rotulados 3.

Como visto na seção 4.2.1, os componentes 8-conectados rotulados mais que P e os componentes 4-conectados de voxels rotulados mais que P na vizinhança-8 de P [$N(P)$] são chamados, respectivamente, de *número de conectividade* $C_8(P)$ e *número de passagem* $X_4(P)$, sendo dados por:

$$C_8(P) = \sum_{p=1}^4 (\bar{n}_{2p-1} - \bar{n}_{2p-1} \times \bar{n}_{2p} \times \bar{n}_{2p+1}) \quad (6.5)$$

$$X_4(P) = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^8 |n_{p+1} - n_p| \quad (6.6)$$

$$p = \begin{cases} i, & \text{se o plano considerado for o plano } xy; \\ j, & \text{se o plano considerado for o plano } xz; \\ k, & \text{se o plano considerado for o plano } yz, \end{cases} \quad (6.7)$$

onde $n_9 = n_1$, e $\bar{n}_p = 1 - n_p$.

Leva-se em conta que, quando $C_8(P)$ e $X_4(P)$ são computados como voxels, toma-se uma versão binária conveniente de $N(P)$. Como exposto na seção 4.2.1.

Os pontos candidatos a $C_8(P)$ e $X_4(P)$ não necessitam ser vizinhos do conjunto de centros máximos, pois todos os pontos da imagem serão avaliados.

Consideram-se, para a avaliação de $C_8(P)$ e $X_4(P)$, os três planos ortogonais a P , plano xy , plano xz e plano yz , como mostra a Figura 6.8.

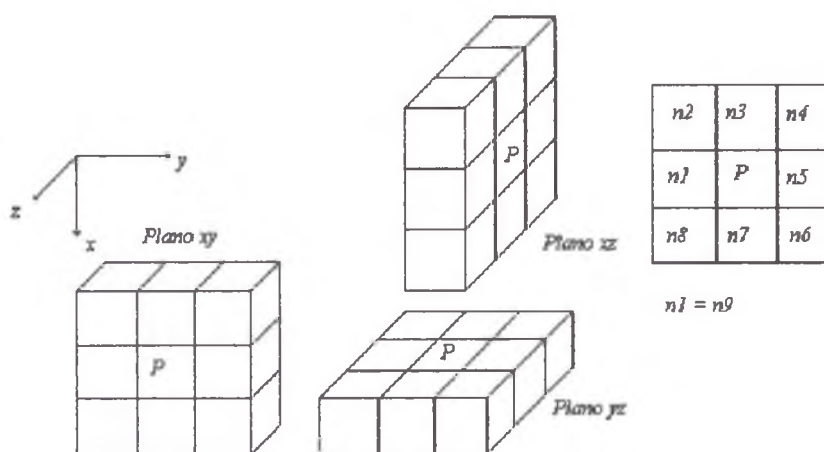


Figura 6.8: Planos xy , xz , yz e seus 8-vizinhos.

6.4- Determinação da seqüência de células elementares

A detecção da seqüência de células elementares da linha mediana 3D será identificada ao longo da trajetória, partindo de células elementares já conhecidas.

A trajetória conectada será crescente, marcando-se na superfície mediana as células elementares para as quais os valores máximos do gradiente são positivos.

A primeira célula elementar a ser marcada na trajetória será uma célula elementar n_p , que seja vizinha de uma célula elementar já marcada P . Utiliza-se o gradiente para definir a trajetória. Então, quando a célula elementar n_p é maior que a célula elementar já marcada P , ou seja, $n_p > P$, o gradiente será determinado por:

$$grad(n_p) = \frac{1}{w_n} (n_p - P) \quad (6.8)$$

$$w_n = \begin{cases} 3, & \text{se vizinho de face;} \\ 4, & \text{se vizinho de aresta;} \\ 5, & \text{se vizinho de vértice.} \end{cases} \quad (6.9)$$

Após a realização dessas três etapas - determinação dos centros máximos, voxels-celas e gradiente obtêm-se a superfície mediana. Para obter-se a linha mediana 3D faz-se um afinamento da superfície mediana, o qual será executado pelo algoritmo proposto por Ma (1994 e 1995) e implementado por Zhirong (1997).

A implementação desse algoritmo prevê o *descascamento* da superfície mediana, ou seja, os voxels serão eliminados até a obtenção de uma linha contínua e unitária, que conserva a topologia e é representativa da imagem.

6.5- Conectividade e número de Euler

6.5.1- Conectividade

A conectividade é um parâmetro topológico que mede o grau para o qual uma estrutura é multiplamente conectada. É definido como o número de caminhos não-redundantes pelos quais podem ser inspecionadas todas as regiões dentro da estrutura do objeto (Dullien, 1992).

O teorema da topologia, que define o número de conectividade C em função do número de ramos b e do número de nós n , é dado por

$$C = b - n + 1 \quad (6.10)$$

O conceito de conectividade é ilustrado na Figura 6.9, na qual se expõem algumas configurações e seus respectivos números de conectividade: Nas Figuras 6.9.a e 6.9.b, o número de conectividade é igual a 1, pois só apresenta um caminho redundante. O número de conectividade é igual a 2 na Figura 6.9.c, pois apresenta dois caminhos redundantes. O número de conectividade igual a 3 é exibido na Figura 6.9.d. A tabela com parâmetros topológicos é exposta na Figura 6.9.e. As linhas na Figura 6.9 são chamadas *deformações retraídas* do objeto.

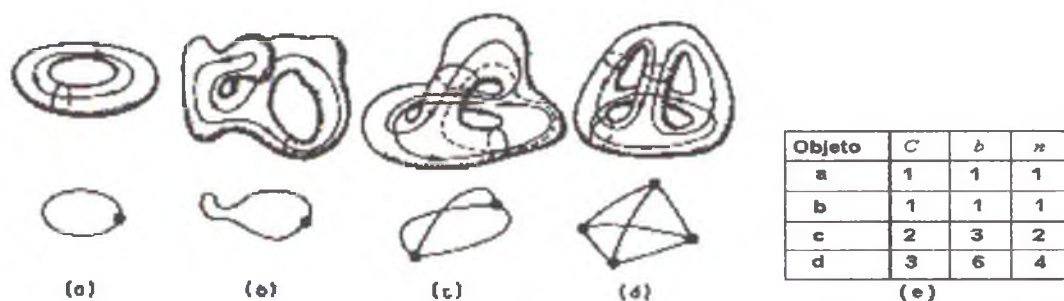


Figura 6.9: Ilustração do conceito de conectividade. Número de conectividade igual a 1 (a) e (b); número de conectividade igual a 2 (c); número de conectividade igual a 3 (d). Tabela com parâmetros topológicos (e).

6.5.2- Número de Euler

Número de Euler X_E é um parâmetro topológico definido a partir do número de componentes de uma estrutura X_K , subtraído do número de túneis X_T e somado ao número de cavidades X_C . O número de Euler é expresso, matematicamente, como

$$X_E = X_K - X_T + X_C \quad (6.11)$$

Na Figura 6.10, são mostradas as três formas básicas de objetos (fechado, túnel e cavidade). A Figura 6.10.a representa o objeto fechado; a Figura 6.10.b, uma estrutura com uma passagem que representa o túnel, e a Figura 6.10.c representa uma cavidade. A tabela com os respectivos números de Euler para cada objeto é exibida na Figura 6.10.d.

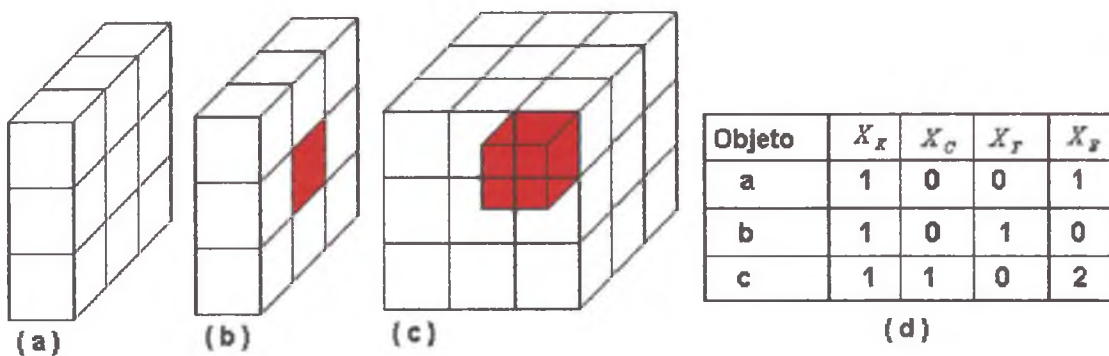


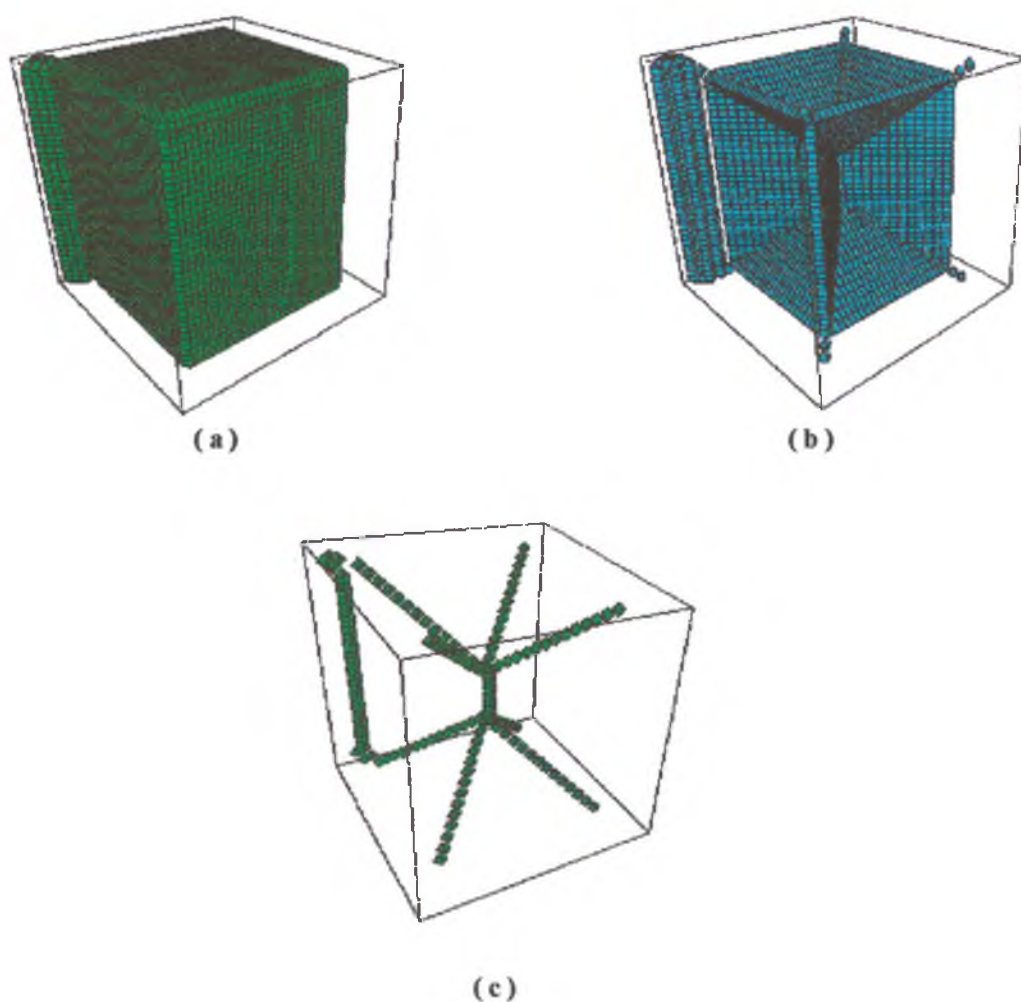
Figura 6.10: Representação de três formas básicas: objeto fechado (a); objeto com túnel (b) e objeto com cavidade (c). Parâmetros topológicos (d).

6.6- Formas básicas com a superfície mediana e linha mediana 3D

As imagens que serão expostas a seguir foram geradas pelo algoritmo implementado neste trabalho e que está inserido no processador de imagens Imago. O algoritmo gera um arquivo de dados numéricos pelo compilador Borland C++, que é depois transformado pelo editor de imagens ISO-3D em imagens tridimensionais.

6.6.1- Imagem 3D - objeto fechado

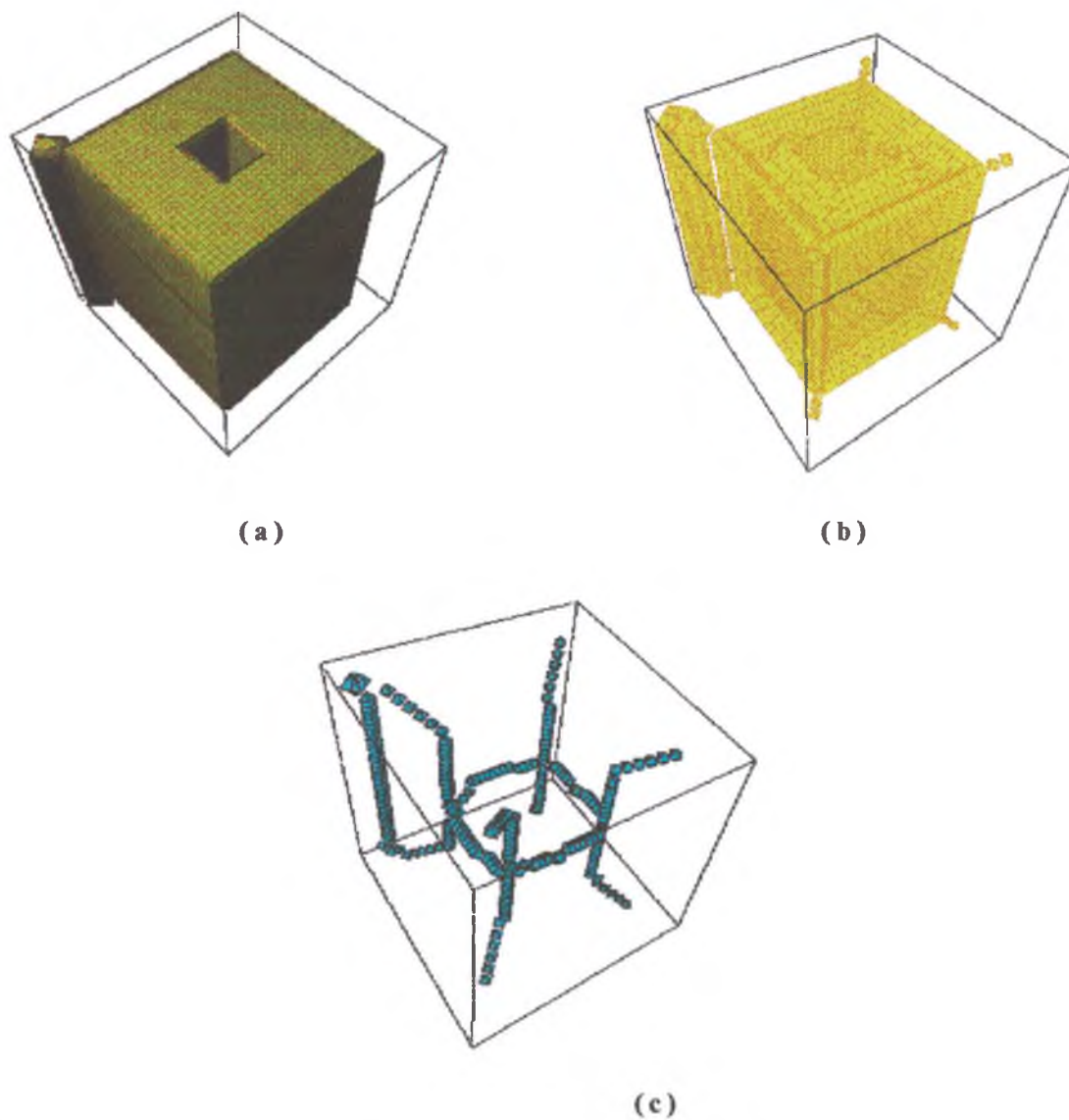
A imagem exibida na Figura 6.11 apresenta a forma básica de um objeto fechado, cujo número de Euler é 1. É um paralelogramo e está exposto na Figura 6.11.a. A superfície mediana é mostrada na Figura 6.11.b. A linha mediana 3D, representativa do paralelogramo, é mostrada na Figura 6.11.c.



**Figura 6.11: Imagem de um paralelogramo de 40^3 (a). Superfície mediana (b).
Linha mediana 3D (c).**

6.6.2- Imagem 3D - túnel

A imagem exibida na Figura 6.12 apresenta a forma básica de um objeto com um túnel, cujo número de Euler é 0 (zero). O paralelogramo com túnel está exposto na Figura 6.12.a. A superfície mediana é mostrada na Figura 6.12.b. A linha mediana 3D representativa do paralelogramo com túnel é mostrada na Figura 6.12.c.



**Figura 6.12: Imagem de um paralelogramo (40^3) com túnel (a). Superfície mediana (b).
Linha mediana 3D (c).**

6.6.3- Imagem 3D - cavidade

A imagem exibida na Figura 6.13 apresenta a forma básica de um objeto com uma cavidade, cujo número de Euler é 2. É um paralelogramo com uma cavidade e está exposto na Figura 6.13.a. A superfície mediana é mostrada na Figura 6.13.b. A linha mediana 3D representativa da cavidade é mostrada na Figura 6.13.c. Nas figuras exibidas, foram feitos cortes para melhor visualização.

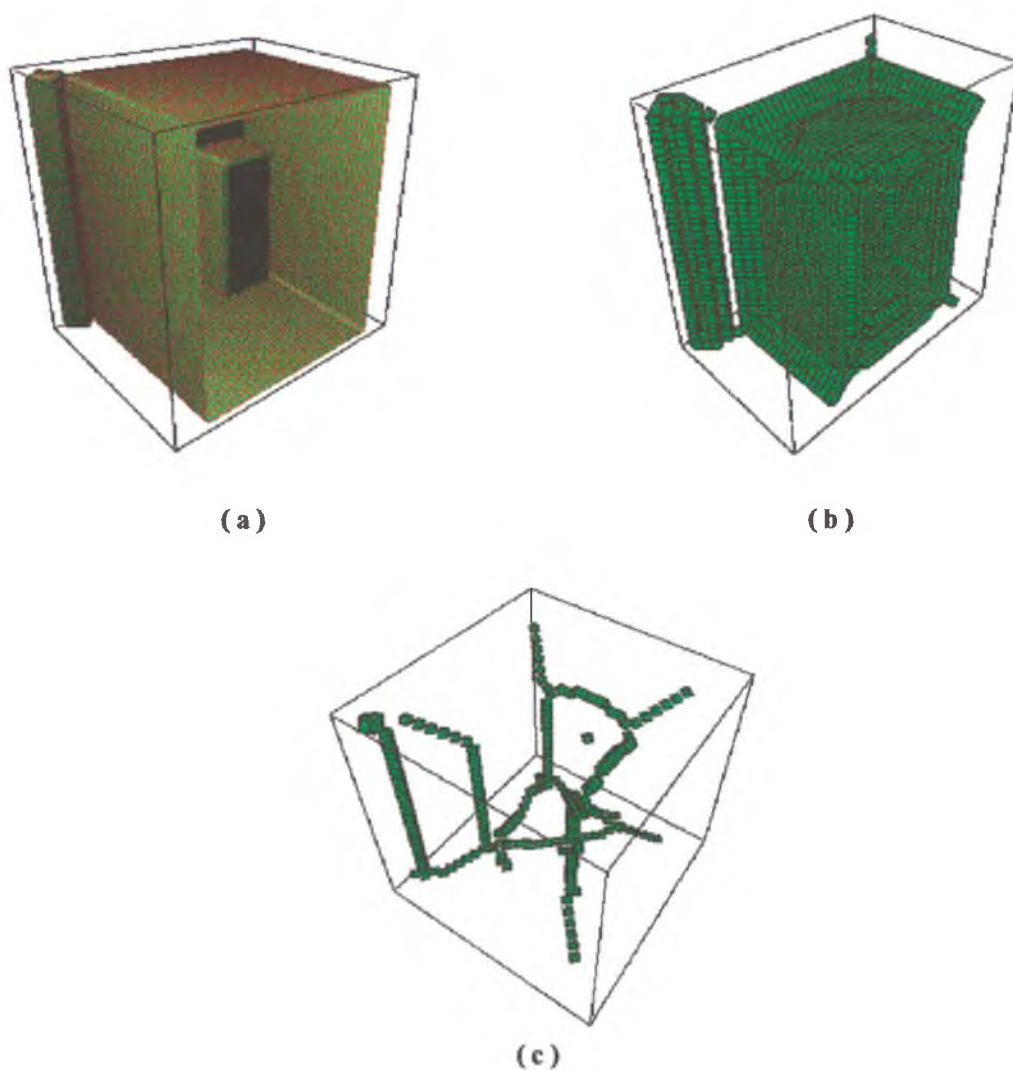


Figura 6.13: Imagem de um paralelogramo (40^3) com uma cavidade (a). Superfície mediana (b). Linha mediana 3D (c).

CAPÍTULO VII

APLICAÇÕES EM IMAGENS DE ROCHAS RESERVATÓRIO

Neste capítulo, procede-se à determinação da linha mediana de imagens bidimensionais da microestrutura de rochas reservatório. A partir do grafo da linha mediana, obtêm-se as distribuições de tamanhos de sítios e ligações, bem como a distribuição de poros total (sítios e ligações) para fins de comparação com a distribuição obtida com a técnica de abertura morfológica. Finalmente, determina-se a linha mediana de uma imagem tridimensional de rocha, obtida pelo método de reconstrução denominado Gaussiana Truncada.

7.1-Programa do grafo da linha mediana 2D

O código computacional desenvolvido neste trabalho para a determinação do grafo da linha mediana 2D foi incorporado em um programa de processamento de imagens (Imago). Na Figura 7.1, mostra-se a interface gráfica do software, evidenciando-se a ferramenta associada à linha mediana.

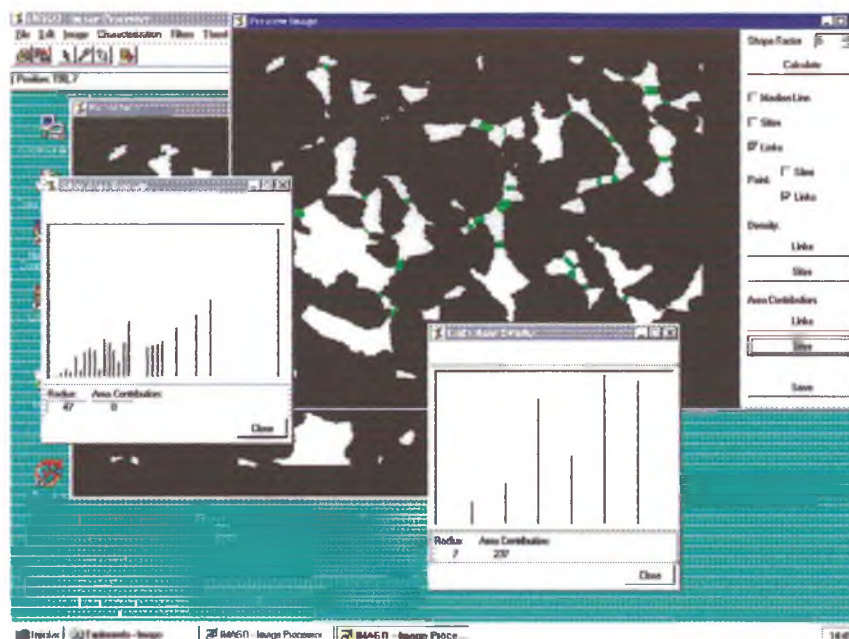


Figura 7.1: Imagem da tela do aplicativo Imago.

O Imago é um software (LMPT/ESSS) de processamento e caracterização de imagens da microestrutura de materiais porosos, com ferramentas que podem ser classificadas em três grupos:

- 1) filtros de pré-processamento;
- 2) binarização de imagens coloridas e em tons de cinza ;
- 3) caracterização de parâmetros geométricos de imagens binárias (onde foi inserido o programa do grafo da linha mediana 2D).

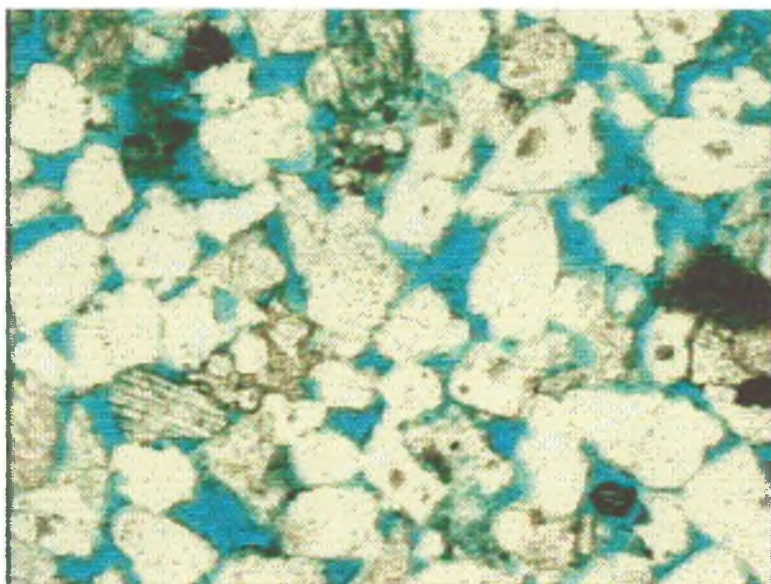
Os filtros de pré-processamento são utilizados para tornar uma imagem mais adequada à sua visualização ou ao processo de binarização. O aplicativo disponibiliza vários filtros no domínio espacial e de frequência (fazendo-se a transformada de Fourier da imagem), sendo os mais usuais os filtros para eliminação de ruídos e aumento de contraste das imagens. O processo de binarização consiste em transformar uma imagem em níveis de cinza ou colorida em uma imagem em preto-e-branco, definindo-se as regiões de poros e de sólidos. Para imagens em tons de cinza,

são disponíveis métodos automáticos e manuais de escolha de um limite de corte (*threshold*). Os métodos automáticos determinam o limite de corte através da maximização da variância ou da entropia de classes de níveis de cinza da imagem. As imagens coloridas, inicialmente em formato RGB (Red, Green, Blue), são transformadas para o modelo de cores HSI (Hue, Saturation, Intensity) e aplicam-se os métodos automáticos aos canais H, S e I, determinando-se para cada um deles o limite de corte. A caracterização estatística da geometria de imagens binárias no Imago envolve os parâmetros: porosidade, função de autocorrelação e função distribuição de volume de poros. O software foi construído inteiramente em C++ orientado a objetos; é portátil para os sistemas (Win32/Unix) pelo fato de utilizar a biblioteca de classes COI-lib 2.0 (Maliska Jr, 1997), que dispõe de inúmeros recursos gráficos para a criação de interfaces, manipulação de imagens e visualização.

7.2- Imagens de microestruturas porosas

Expõem-se, a seguir, duas imagens em que se aplica o processador de imagens. Apresentam-se algumas etapas da determinação da distribuição de tamanhos de sítios e ligações pela técnica do grafo da linha mediana 2D e pela técnica da operação de abertura. Essas imagens foram obtidas pelo Cenpes/Petrobras: o espaço poroso foi impregnado por uma resina com um corante, tendo-se confeccionado uma lâmina delgada para observação no microscópio ótico. Nas imagens coloridas, pode ser observada a presença de regiões pretas que, segundo dados do Cenpes/Petrobras, constituem-se provavelmente de óleo morto ou minerais opacos. Tais regiões são consideradas como matriz sólida no processo de binarização.

A imagem colorida de um arenito berea codificada 320220 é mostrada na Figura 7.2.a. A imagem colorida foi filtrada por um filtro passa baixa para diminuir os ruídos e, após, foi binarizada utilizando-se o Imago. Na Figura 7.2.b, mostra-se a imagem binária com a sólida em preto e a fase poro em branco.



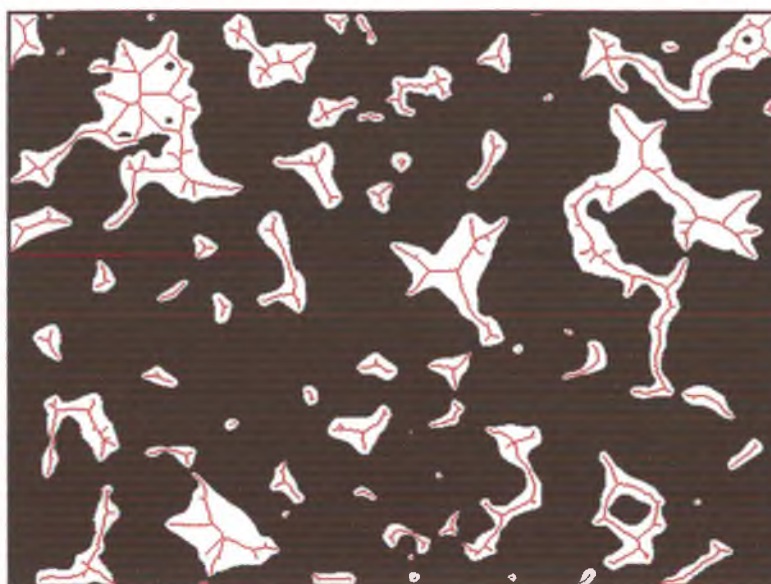
(a)



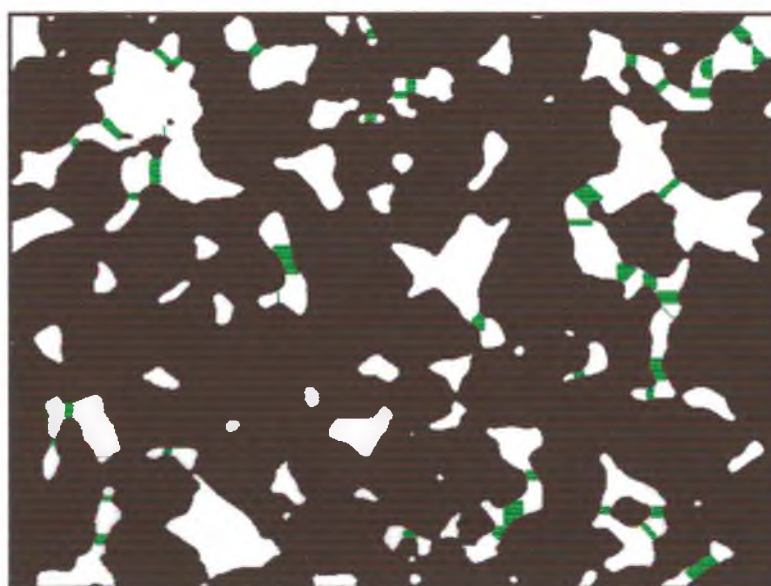
(b)

Figura 7.2: Imagem colorida do berea 320220 (a) Imagem binária do berea 320220 (b) .

O algoritmo do grafo da linha mediana 2D foi aplicado na imagem da Figura 7.2.b, determinando-se a linha mediana da fase poro, que é mostrada na Figura 7.3.a. A Figura 7.3.b mostra somente a caracterização das ligações (áreas verdes).



(a)



(b)

Figura 7.3: Linha mediana da imagem berea 320220 (a) e a caracterização das ligações (b) .

A caracterização geométrica pelo grafo da linha mediana em sítios (áreas verdes) e ligações (áreas azuis) é mostrada na imagem da Figura 7.4.

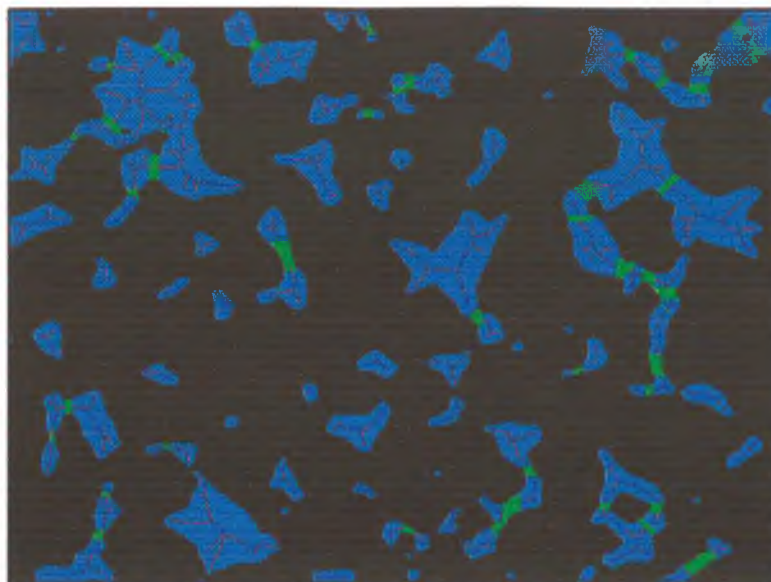
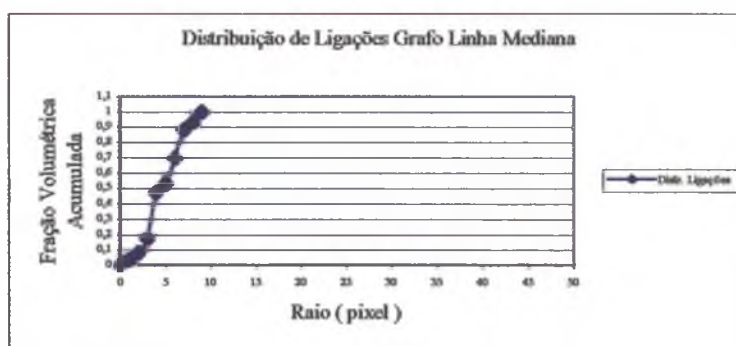
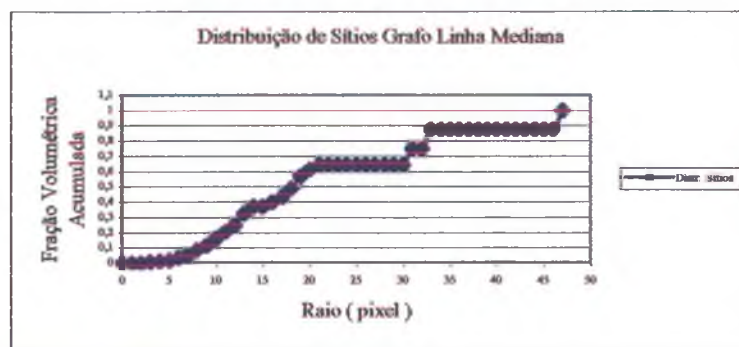


Figura 7.4: Imagem berea 320220 com a caracterização de sítios (azul) e ligações (verde).

Expõe-se, no gráfico da Figura 7.5.a, a distribuição de tamanhos de ligações. Na Figura 7.5.b, é exibido o gráfico da distribuição de tamanhos de sítios. Essas distribuições são obtidas separadamente pela técnica do grafo da linha mediana 2D. Ambos os gráficos são relativos a dados obtidos a partir da imagem da Figura 7.2.b.



(a)



(b)

Figura 7.5: Gráfico da função distribuição de ligações (a) e sítios (b) da Figura 7.2.b.

A distribuição de poros (sítios + ligações) para a imagem da Figura 7.2.b, obtida pela técnica do grafo da linha mediana, é mostrada na Figura 7.6.

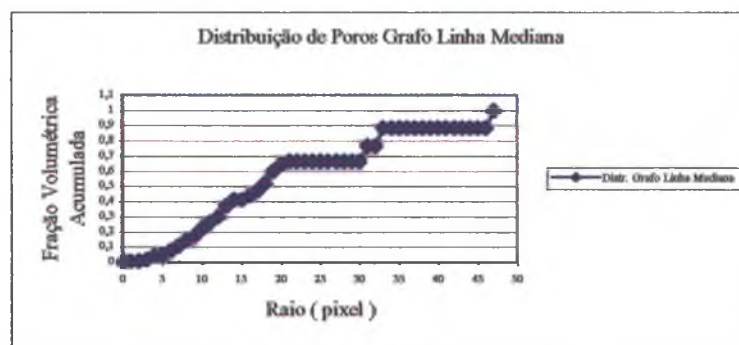


Figura 7.6: Gráfico da função distribuição de poros obtida pelo grafo da linha mediana da Figura 7.2.b.

A distribuição de poros para a imagem da Figura 7.2.b obtida pela técnica da operação de abertura é exibida no gráfico da Figura 7.7.



Figura 7.7: Distribuição de poros da imagem da Figura 7.2.b obtida pela técnica da operação de abertura.

O gráfico que compara as distribuições de poros, obtidas pelas técnicas do grafo da linha mediana e operação de abertura para a imagem berea 320220, é mostrado na Figura 7.8.

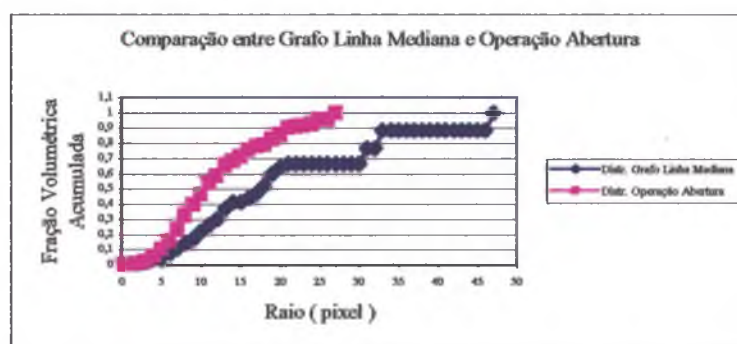
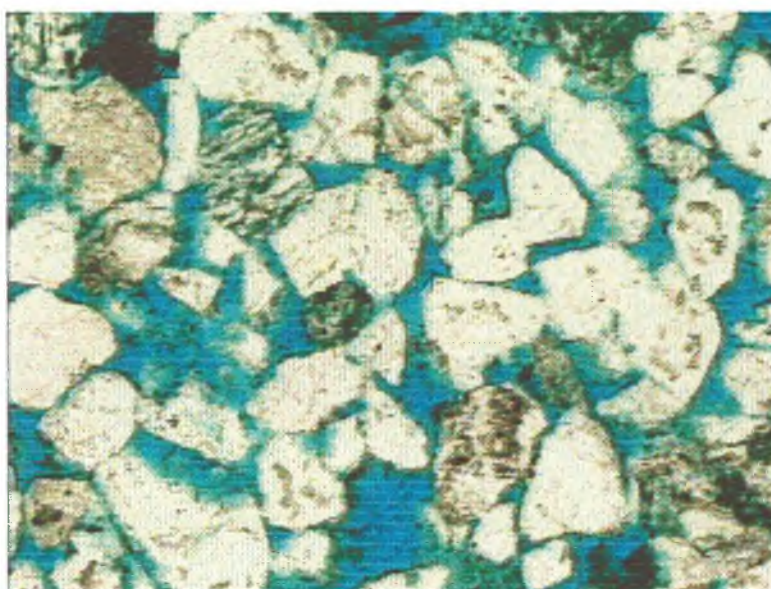


Figura 7.8: Comparação das distribuições de poros para a imagem 320220.

A imagem analisada do arenito berea 320220 tem um tamanho de (609 x 458) pixels, totalizando 278922 pixels; desses, 60711 pixels pertencem à fase poro (porosidade de aproximadamente 22%). Na caracterização dos sítios e ligações, ocorre uma perda de área (áreas em branco na Figura 7.4) de 41 pixels, o que representa

0,067% da área da fase poro. A área que equivale aos sítios (área em azul) é de 56649. A área que equivale às ligações (área em verde) é de 4021 pixels. Cada pixel corresponde a 2,6 micra.

Na Figura 7.9.a, mostra-se a imagem colorida do arenito berea codificado 318238, a qual foi filtrada por um filtro passa baixa. Na Figura 7.9.b, tem-se a imagem binária correspondente.



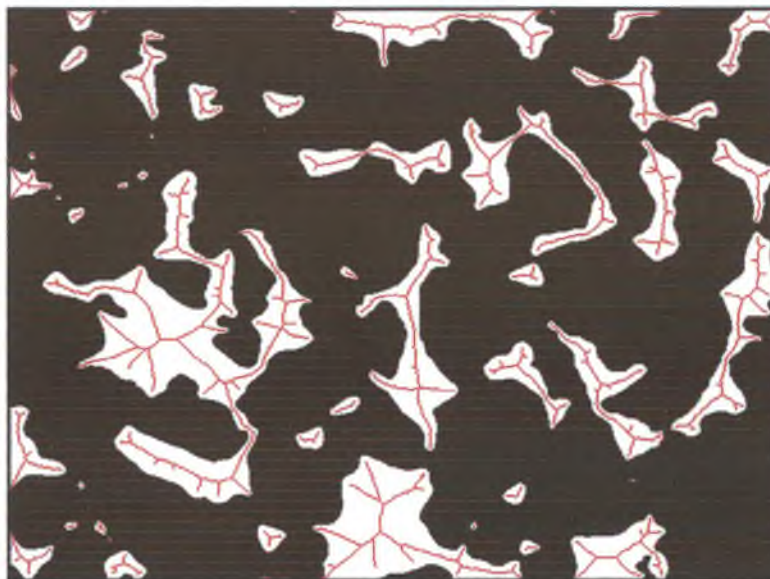
(a)



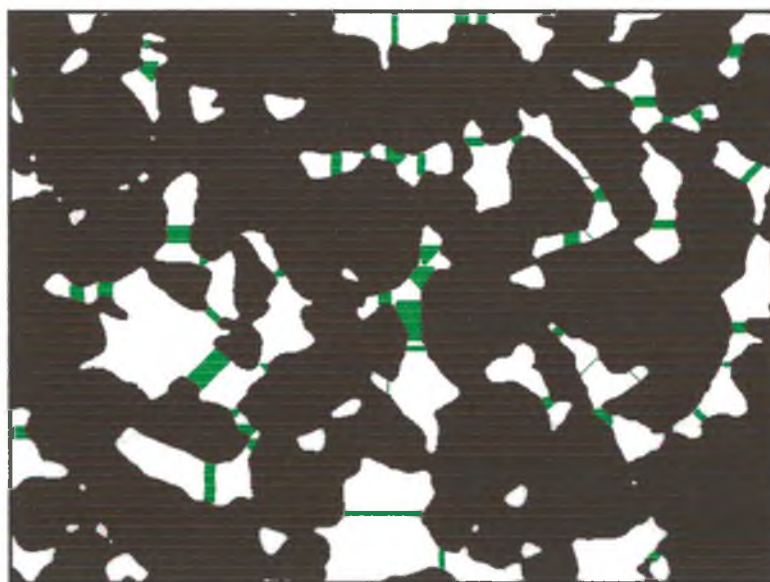
(b)

Figura 7.9: Imagem colorida do berea 318238 (a). Imagem binária (b) .

A linha mediana desta imagem binária é exibida na Figura 7.10.a, e as áreas caracterizadas como ligações (em verde) são mostradas na Figura 7.10.b.



(a)



(b)

Figura 7.10: Linha mediana da imagem berea 318238 (a) caracterização das ligações (b).

A imagem que exibe a caracterização geométrica dos sítios e ligações da microestrutura do arenito berea 318238 pelo grafo da linha mediana 2D é apresentada na Figura 7.11.

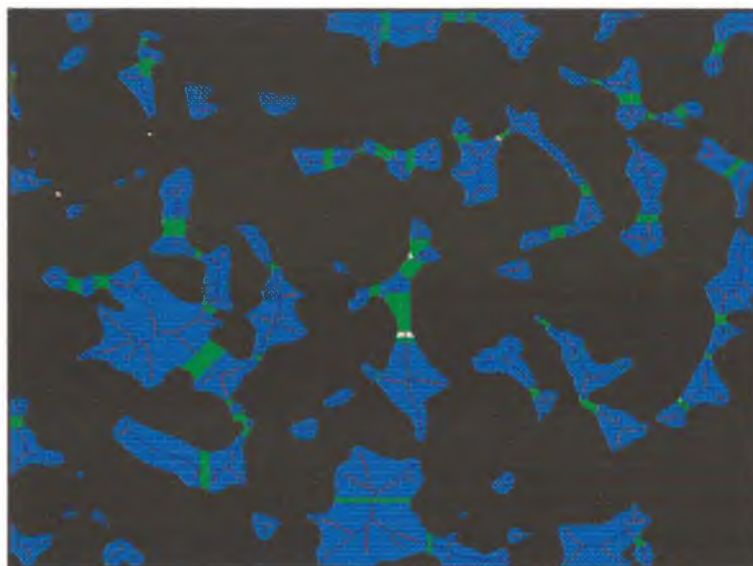
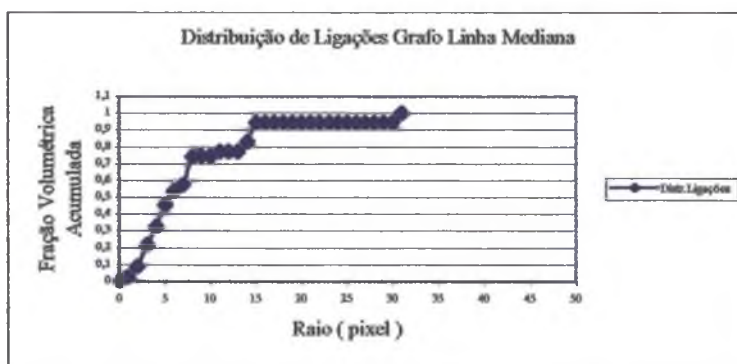
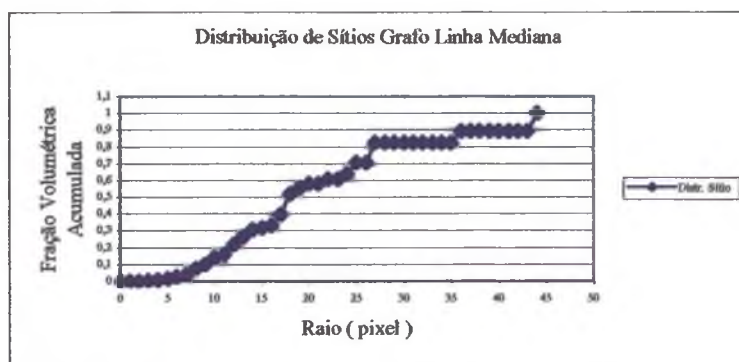


Figura 7.11: Imagem berea 318238 com a caracterização dos sítios e ligações.

Os gráficos das Figuras 7.12.a e 7.12.b exibem as funções de distribuição de ligações e sítios, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 7.12: Distribuição pelo grafo da linha mediana, de ligações (a) e sítios (b) da Figura 7.9 .

No gráfico da Figura 7.13, é mostrada a função distribuição de poros total (sítios + ligações) obtida pela técnica do grafo da linha mediana para a imagem do berea 318238.

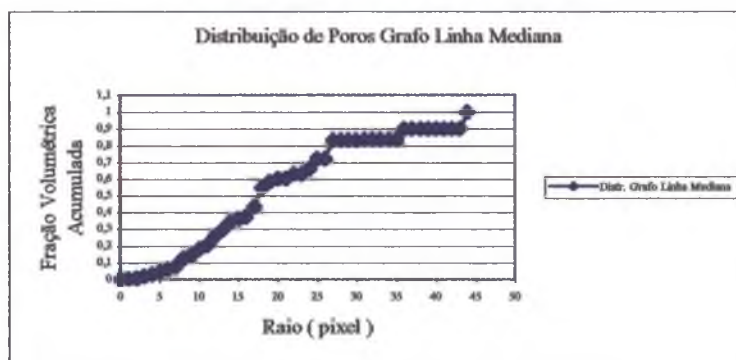


Figura 7.13: Gráfico da função distribuição de poros pela técnica do grafo da linha mediana da Figura 7.9 .

O gráfico que faz a comparação das distribuições de poros obtidas pelas técnicas da linha mediana e operação de abertura é mostrado na Figura 7.14.

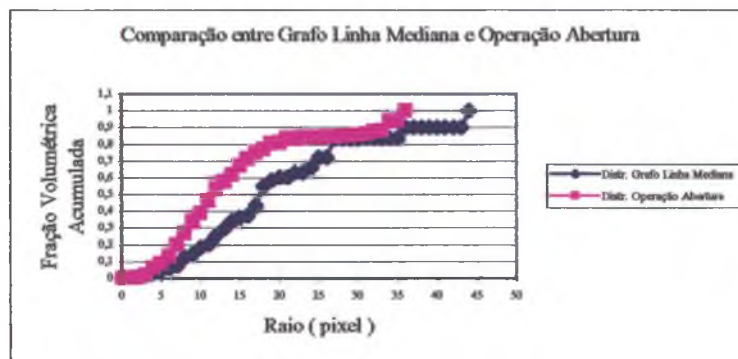


Figura 7.14: Distribuições de poros obtidas pelas técnicas da linha mediana e operação de abertura para a Figura 7.9 .

A imagem analisada do arenito berea 318238 tem um tamanho de (612 x 458), o que dá 280296 pixels. A fase poro possui 64251 pixels, ou seja, a porosidade da imagem é de, aproximadamente, 23%. Para a caracterização dos sítios e ligações, ocorre uma perda de área (áreas em branco na imagem da Figura 7.11) de 1100 pixels, o que equivale a 1,71% da área da fase poro. A área das ligações (em verde) é de 4429 pixels e a área dos sítios (em azul), de 58722 pixels. O fator de forma utilizado foi de 2%.

As perdas em área (em branco) constatadas nos casos analisados das imagens de berea 320220 e 318238 devem-se aos poros muito pequenos, de forma que a linha mediana representa poucos pixels, os quais são eliminados para que se eliminem alguns ramos e se determinem outras ligações. A perda de área ocorre também quando a área não pertence a nenhum grupo-sítio ou grupo-ligação, ou seja, não foi reconstituída por nenhuma bola maior ou menor.

Ocorrem diferenças nas inclinações das curvas nos dois casos analisados porque o gráfico da distribuição de tamanhos de poros obtida pela operação de abertura superestima poros de pequenos diâmetros nos cantos dos poros, enquanto

que a distribuição de tamanhos de poros obtida pelo grafo da linha mediana avalia os sítios e as ligações como objetos distintos e conectados entre si.

A separação da distribuição de tamanhos de poros em uma distribuição de sítios e ligações é exibida como vantagem na caracterização geométrica pela técnica do grafo da linha mediana 2D em relação à técnica de operação de abertura. A identificação das ligações permite localizar as posições no meio poroso em que um fluido encontra maior resistência ao deslocamento.

O número de ligações está diretamente relacionado ao fator de forma: quanto maior o fator de forma, menos ligações serão determinadas.

Algumas conexões são rompidas em função do processo de binarização. Por isso, uma melhor identificação das ligações depende diretamente da qualidade do processo de binarização da imagem.

7.3- Imagens reconstruídas 3D

O algoritmo de caracterização da linha mediana de estruturas porosas tridimensionais, descrito no capítulo anterior, foi utilizado em imagens reconstruídas de rochas reservatório. Na Figura 7.15, é exibida uma imagem tridimensional do arenito berea 320220, reconstruída pelo método da Gaussiana Truncada, com o tamanho de 50^3 voxels. Utilizou-se o método de Gaussiana Truncada desenvolvido por Zhirong et alii (1997) e que se encontra disponível no software Imago. Como citado na seção 2.4.2, este método gera uma imagem tridimensional, conservando a porosidade e a função de autocorrelação medidas na imagem bidimensional.

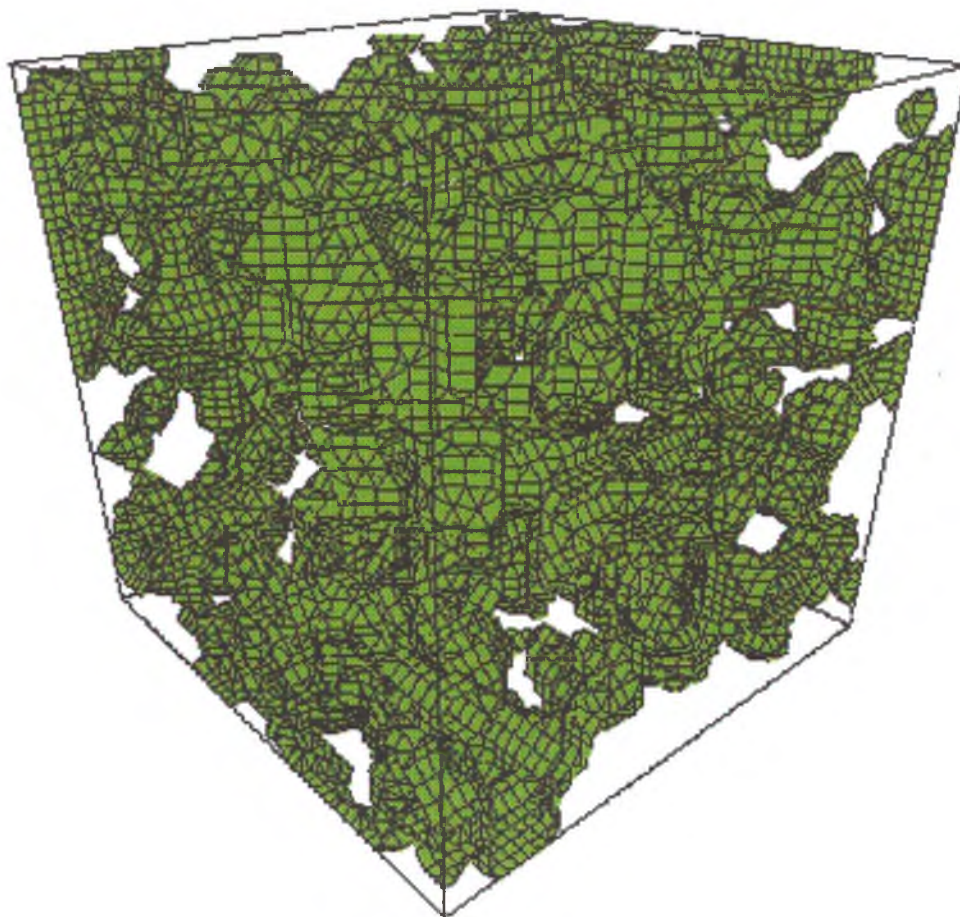


Figura 7.15: Imagem reconstruída do berea 320220 (50^3 voxels).

A Figura 7.16 apresenta a superfície mediana da imagem reconstruída da Figura 7.15. Essa imagem é constituída dos centros de bolas máximas inclusas mais os pixels de conexão (voxels-celas) e os obtidos a partir do gradiente, como exposto no capítulo VI.

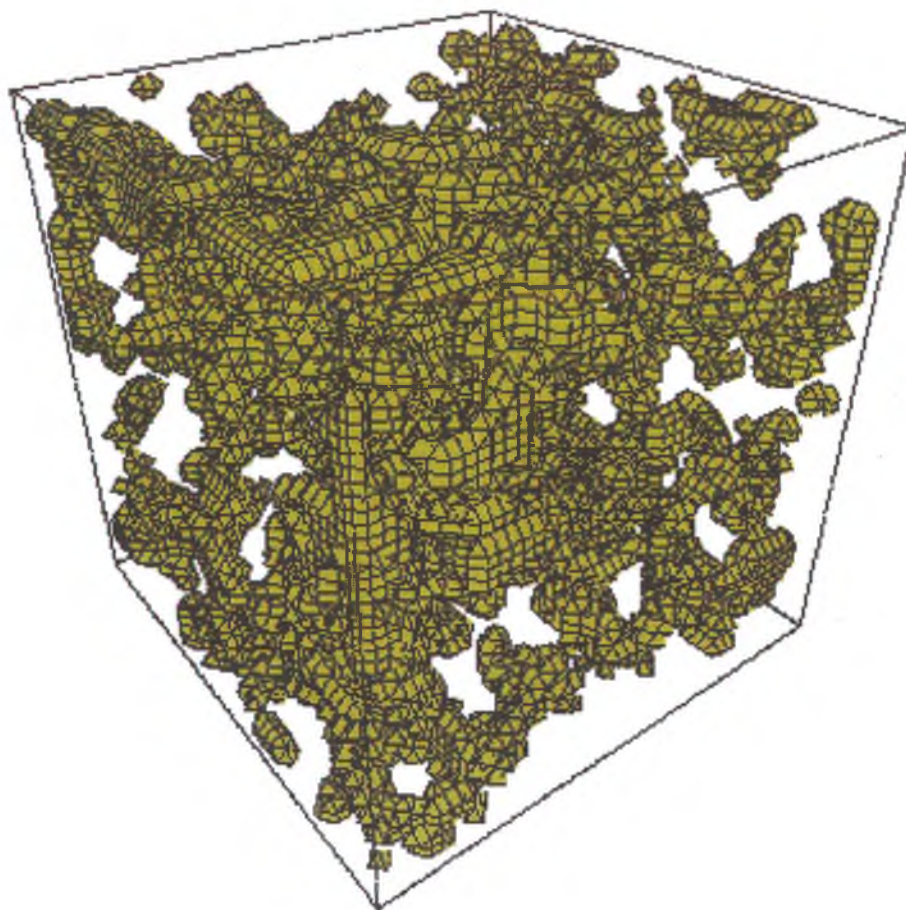


Figura 7.16: Imagem com a superfície mediana da Figura 7.15.

O afinamento da superfície mediana a partir do algoritmo proposto por Ma (1994 e 1995) e implementado por Zhirong (1997) é exibido na Figura 7.17. O resultado do afinamento da superfície mediana é a linha mediana 3D.

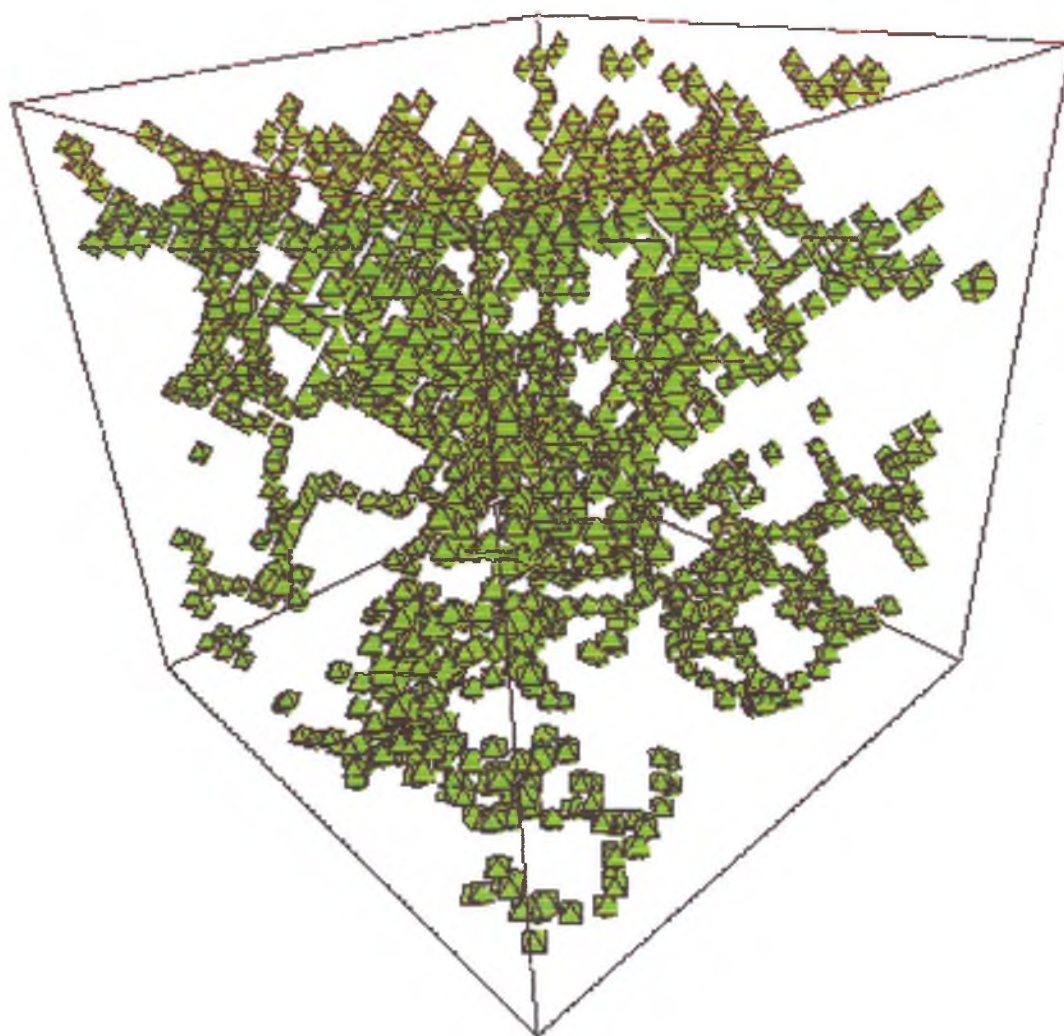


Figura 7.17: Imagem com a linha mediana 3D da Figura 7.15.

Na Figura 7.18, apresenta-se um outro modo de visualização da linha mediana da estrutura reconstruída do berea 320220. Nessa imagem, os voxels mostrados em azul possuem somente dois vizinhos e os voxels vermelhos apresentam mais de dois vizinhos.

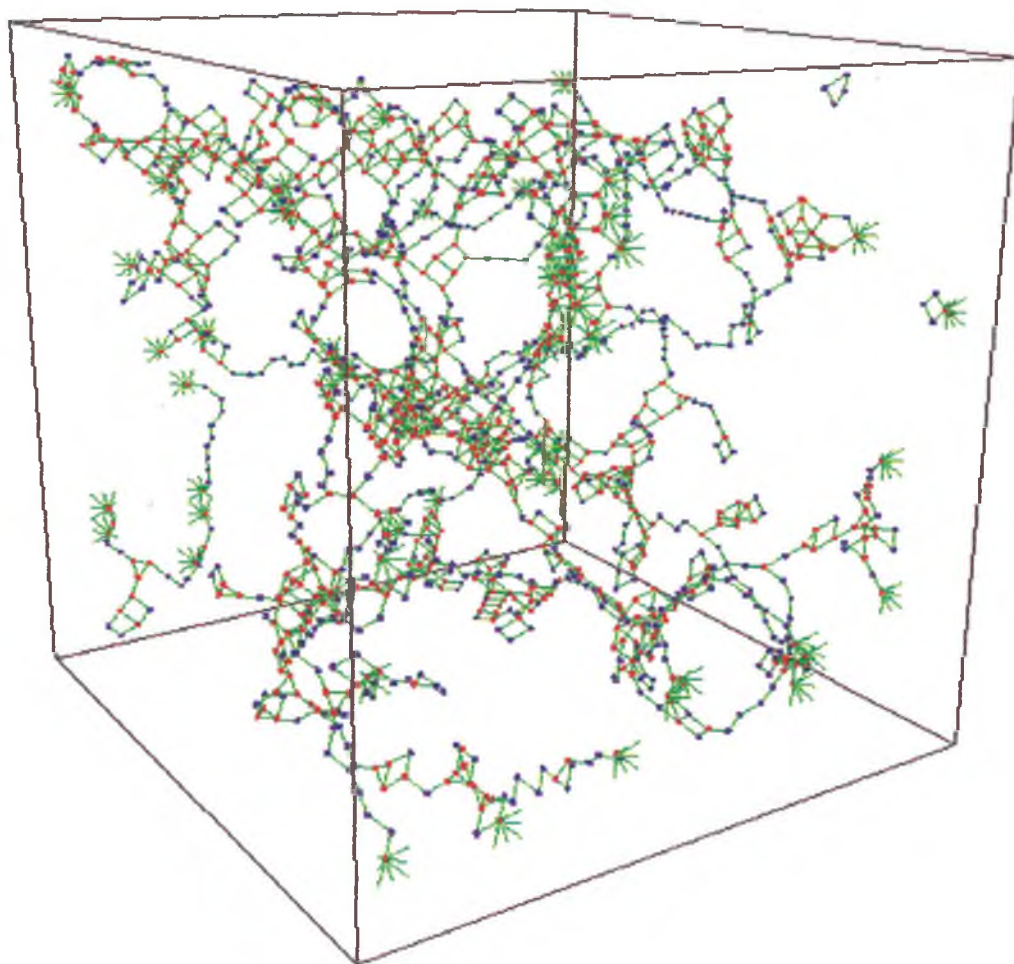


Figura 7.18: Imagem da linha mediana 3D da Figura 7.15. Os voxels azuis possuem dois vizinhos e os voxels vermelhos possuem mais de dois vizinhos

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

8.1- Conclusões

A utilização de técnicas de análise de imagens para a caracterização da geometria de materiais porosos mostra-se bastante poderosa, permitindo obter informações acerca da forma dos poros e de como estes se encontram conectados. Este trabalho apresentou duas técnicas de análise de imagens: a técnica do grafo da linha mediana 2D e a operação morfológica de abertura, dando-se ênfase à primeira. Para a utilização dessas técnicas em imagens digitais, foram apresentados os conceitos básicos da geometria discreta, tendo-se definido métricas de chanfro e o conceito de imagem de distância ao complementar.

Os resultados apresentados para a caracterização geométrica do meio poroso evidenciam a potencialidade da técnica do grafo da linha mediana para a obtenção de dados que representam a configuração espacial do meio. Este trabalho procurou determinar a distribuição de tamanhos de poros para imagens de um arenito berea e para imagens geradas por um editor gráfico utilizando a operação de abertura e o grafo da linha mediana 2D. Pelo método do grafo da linha mediana 2D, obtêm-se, separadamente, uma distribuição de tamanhos de cavidades (sítios) e uma distribuição de tamanhos de estreitamentos (ligações), quer dizer, a linha mediana caracteriza o meio em sítios e ligações como objetos distintos e conectados entre si, o que permite uma caracterização

mais detalhada do meio poroso do que com a operação de abertura. De fato, a operação de abertura realiza a partição de regiões da fase poro, não distinguindo entre cavidades e estreitamentos.

Compararam-se as funções distribuições de tamanhos de poros total (sítios e ligações) determinadas pelas técnicas da operação de abertura e do grafo da linha mediana 2D. Observaram-se, nos casos analisados, as diferenças nas inclinações das curvas de distribuição de tamanhos de poros. Tais diferenças observadas nos gráficos analisados devem-se ao modo como as técnicas realizam a partição das regiões da fase poro. A operação de abertura considera como poros de pequenos diâmetros regiões como protuberâncias e rugosidades dos poros. Por outro lado, na caracterização com a técnica do grafo da linha mediana, considera-se uma cavidade com suas protuberâncias e rugosidades como um objeto único, computando-se a área do objeto para a determinação de um raio equivalente ao do círculo de mesma área do objeto. Dessa forma, em relação ao grafo da linha mediana, a operação de abertura superestima as áreas associadas a pequenos poros.

O código computacional de linha mediana implementado neste trabalho permite a descrição dos elementos formadores de uma rede de percolação (sítios e ligações). O grafo da linha mediana 2D contém as informações de conectividade entre objetos da imagem, sendo possível a determinação de números de coordenação locais, o que representa uma vantagem sobre o método da operação de abertura.

A utilização de imagens, conjugada à técnica do grafo da linha mediana 2D, é importante para a caracterização geométrica da microestrutura porosa, permitindo a complementação de informações obtidas através de técnicas usualmente empregadas para a investigação de estruturas porosas como ensaios de porosimetria a mercúrio e ensaios de adsorção e dessorção de gases.

A linha mediana 3D proporciona um meio de visualização da estrutura porosa, tornando possível obter informações tanto visuais como quantitativas sobre a conectividade do espaço poroso.

A linha mediana 3D é extraída fazendo-se uma analogia do caso bidimensional até a obtenção da superfície mediana. Na etapa de afinamento da superfície mediana, utilizou-se o algoritmo proposto por Ma (1994 e 1995) e implementado por Zhirong (1997). Obtendo-se assim, uma linha contínua e unitária que conserva a

conectividade, isto é, a linha mediana 3D e a estrutura original de poros têm a mesma topologia.

Foram propostos muitos algoritmos para a obtenção de esqueletos de imagens 2D, o que não é o caso para imagens 3D. Uma possível razão para isso é que a prova para um algoritmo 3D de esqueletização que preserve a conectividade é muito mais difícil que no caso 2D. Esse problema foi resolvido por Ma (1994 e 1995). Usando os resultados obtidos por ele, foi implementado um algoritmo 3D, o qual, junto com a idéia da linha mediana 2D proposto por Di Baja (1991), permite determinar um linha mediana 3D que preserva a conectividade mantendo a topologia do meio.

8.2- Sugestões para trabalhos futuros

Com o uso dessas técnicas de análise de imagens, podem-se obter várias características geométricas da imagem. Tais informações podem ser utilizadas em modelos geométricos da estrutura, permitindo a simulação de fenômenos físicos, como, por exemplo, a invasão de mercúrio (fluido não-molhante).

Existem poros que são mais amplos no interior do que na saída (*ink bottles*), nos quais o mercúrio entrará quando atingir a pressão correspondente ao raio capilar. Uma vez realizada a intrusão, os espaços ficam completamente preenchidos. Quando o mercúrio que entrou através do capilar na pressão apropriada sofre redução da pressão com a extrusão, parte fica retida no poro *ink bottle* (Figura 8.1). Essa situação leva ao efeito de histerese (Adamson, 1990). A partir da linha mediana 2D, é possível determinar esses poros que são características importantes da estrutura porosa, como os poros que retêm o fluido no caso da extrusão do mercúrio.



Figura 8.1: Esboço de um poro *ink bottle*.

A linha mediana 3D pode ser utilizada para a determinação do grafo da linha mediana 3D, ou seja, obter uma distribuição de poros análoga à distribuição de poros em 2D, determinando uma distribuição de sítios e ligações a partir de uma imagem reconstruída.

Com a obtenção da linha mediana 3D, é possível avaliar-se a permeabilidade a partir de imagens reconstruídas pela Gaussiana Truncada em substituição ao esqueleto implementado por Zhirong (1997).

Pode-se implementar, a partir da linha mediana 2D ou 3D, o caminho preferencial do fluido eliminando-se os pontos pertencentes aos ramos.

Uma outra sugestão é de que seja feita uma comparação entre os resultados da função distribuição de poros obtida a partir da linha mediana 2D ou 3D e a obtida a partir do ensaio de porosimetria a mercúrio.

BIBLIOGRAFIA

Adamson, A.W.- *Physical chemistry of surfaces, fifth edition*. Copyright, John Wiley & Sons, Inc., 1990.

Adler, P.M., Jaquin, C.G., Quiblier, J.A.- *Flow in simulated porous media*. Int J. Multiphase Flow 16, 691-712, 1990.

Arcelli, C.- *From thick to nearly thin digital figure*. Digital signal Processing. Elsevier Science Publishers B.V., 1984.

Chassery, J.M.; Montanvert, A.- *Géométrie discrète en analyse d'images*. Paris: Editions Heremes, 1991.

Chatzis, I.; Dullien, F.A.L.- Mise en oeuvre de la théorie de la percolation pour modéliser le drainage des milieux poreux et la perméabilité au liquide non mouillant injecté. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, v.37, n.2, mars-avril 1982.

Coster, M.; Chermant, J.L.- *Precis D'analyse D'images*. Presses du CNRS, Paris, 1989.

Di Baja, G.S.- Well-shaped, stable, and reversible skeletons from the (3-4)-distance transform, *Journal of Visual communication and image representation*, v.5, n.1, March, pp. 107-115, 1991.

Dullien, F.A.L.- *Porous media- Fluid transport and pore structure*. San Diego: Academic Press, 1992.

Facon, J.- *Morfologia matemática: teoria e exemplos*. Curitiba: Editora Universitária Champagnat da Pontífica Universidade Católica do Paraná, 1996.

Fernandes, C.P.- *Caracterização morfotopológica de espaços porosos: reconstituição multiescala e simulação de processos de invasão de fluidos não-molhantes*. Tese Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1994.

Gonzalez, R.C., Wood, R. E.- *Digital Image processing*. Addison- Wesley Publishing Company, 1992.

Hazlett, R.D.- Simulation of capillary-dominated displacements in micromographic images os reservior rocks. *Transport in Porous Media*, 20: 21-35, 1995.

Koplik, J., Lin, C, Vermette, M.- Conductivity and permeability from microgeometry. *J. Appl. Physical*, 56 (11), 3127-3131, 1984.

Kwiecien, M.J., Macdonald, I.F. and Dullien, F.A.L.- Three- dimensional reconstruction of porous media from serial section data. *J. Of Microscopy*, 159: 343-359, 1990.

Ma, C.M.- A 3D fully parallel thinning algorithm for generating medical faces, *Pattern Recognition Letters* 16 83-87, 1995.

Ma, C.M.- On topology preservation in 3D thinning, *CVGIP: Imagem understanding*, v.59,n.3, May, pp. 328-339, 1994.

Magnani, F.S.- *Determinação das configurações de equilíbrio em meios porosos indeformáveis*. Tese Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

Maliska Júnior, C.R.- *COI-lib 2.0, Classe & Objects for Interfacing – Programming Manual, versão 2.0*. ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software), 1997.

Montanvert, A.- *Contribution au traitement de formes discretas*. Squelettes et codage par graphe de la ligne mediane. Thèse en Docteur de L'Université en informatique . L'Institut Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 1987.

Moschetto, C.- *Caractérisation de la structure poreuse des matériaux par analyse d'images: apport des distances discrètes à la morphologie mathématique*. Rapport de Stage. Grenoble, 49 pp., 1991.

Philippi, P.C.; Yunes, P.R.; Fernandes, C.P.; Magnani, F.S.- The microestructure of porous building materials: study of a cement and lime mortar. *Transport in Porous Media* 14, 219-245, 1994.

Philippi, P.C., Fernandes, C.P.- *Segmentação de imagens coloridas de rochas reservatório*. Relatório Técnico Interno do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, 1995

Pieritz, R.A.- *Desenvolvimento das técnicas do grafo da linha mediana e da binarização por regiões conexas aplicadas à caracterização geométrica de meios porosos*. Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1994.

Pieritz, R.A.- *Modélisation et simulation de milieux poreux par réseaux topologiques*. Thèse en Docteur de L'Université Joseph Fourier, Grenoble I, 1998

Pieritz, R.A.; Philippi, P.C.; Fernandes, C.P.- *Caracterização da função distribuição de poros através da análise de imagens*. XXI ENEMP- Encontro Nacional de Escoamentos em Meios Porosos, Ouro preto- Minas Gerais, v. III, pp 848- 857, 1993.

Thiel, E.- *Amelioration des distances du chanfrein. Constrution de la ligne médiane et décomposition des formes*. Mémoire de DEA, Grenoble: Institut de Mécanique de Grenoble, 1991.

Zhirong, L.- *Computer generation and application of 3D reconstructed porous media: from 2D imagens to the prediction of permeability*. Tese Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

ANEXOS

Nos anexos a seguir, apresentam-se os fluxogramas dos principais programas desenvolvidos neste trabalho para a caracterização geométrica da microestrutura do meio poroso através do grafo da linha mediana 2D e a obtenção da linha mediana 3D para estruturas reconstruídas. O programa é implementado em programação orientada a objetos utilizando o compilador Borland C++; utiliza a biblioteca COI-lib 2.0 com inúmeros recursos gráficos. No caso 3D, além da biblioteca COI-lib2.0, utiliza, para a obtenção das imagens, o programa de visualização ISO-3D. Os programas desenvolvidos neste trabalho estão inseridos no processador de imagens Imago, desenvolvido pelo LMPT (Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas dos Materiais) e pela ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software).

O Anexo I apresenta os fluxogramas do programa do grafo da linha mediana 2D. O programa destina-se à caracterização geométrica da microestrutura porosa. Determina a distribuição de tamanhos de poros separando-os em uma distribuição de sítios e uma distribuição de ligações. Os fluxogramas são:

AI.1- Fluxograma para a determinação da linha mediana 2D afinada;

AI.2- Fluxograma para eliminação dos últimos pixels;

AI.3- Fluxograma para obtenção dos sítios-grupos e ligações-grupos;

AI.4- Fluxograma de rotulação e obtenção dos sítios e ligações-objetos;

AI.5- Fluxograma para obtenção da linha-limite;

AI.6- Fluxograma para pintura e determinação das áreas dos sítios e ligações.

No Anexo II, expõe-se um fluxograma do programa para a obtenção da linha mediana 3D. O programa é desenvolvido a partir de uma analogia da linha mediana 2D. O programa implementado neste trabalho obtém a superfície mediana (centros máximos, voxels-celas e gradiente). Utilizando-se um objeto implementado por Zhirong (1997) a partir da superfície mediana, obtém-se a linha mediana 3D. O fluxograma é:

AII.1- Fluxograma para obtenção da linha mediana 3D.

ANEXO I

FLUXOGRAMAS DO PROGRAMA DO GRAFO DA LINHA MEDIANA 2D

Programa do grafo da linha mediana 2D é um programa para a caracterização geométrica da microestrutura porosa. Determina a distribuição de tamanhos de poros, obtendo, separadamente, uma distribuição de tamanhos de sítios e uma distribuição de tamanhos de ligações.

AI.1- Fluxograma para determinação da linha mediana 2D afinada

Apresenta-se o programa de implementação da linha mediana 2D afinada, utilizando o algoritmo proposto por Gabrielle Sanitti Di Baja (1991).

Entrada: imagem binária 2D com poro (1) sólido (0).

Saída: imagem de distância ao fundo (IDF) mais a coleção de pixels da linha mediana 2D afinada.

Procedimento: veja-se Figura AI.1.

AI.2- Fluxograma para eliminação dos últimos pixels

A eliminação dos últimos pixels da linha mediana 2D afinada é feita para que se eliminem alguns ramos e se determinem outras ligações. São

eliminados também os últimos pixels para a determinação das ligações cujo peso é 3 e/ou 4.

Entrada: coleção da linha mediana 2D afinada.

Saída: coleção da linha mediana 2D afinada sem os últimos pixels.

Procedimento: veja-se Figura AI.2.

AI.3- Fluxograma para obtenção dos grupos-sítios e grupos-ligações

A determinação das bolas maiores e menores é feita para a definição de grupos-sítios e grupos-ligações a partir da linha mediana 2D afinada.

Entrada: coleção de pixels da linha mediana 2D afinada sem os últimos pixels.

Saída: imagem de distância ao fundo mais a coleção de pixels da linha mediana 2D afinada e a coleção de grupos-sítios e grupos-ligações.

Procedimento: veja-se Figura AI.3.

AI.4- Fluxograma de rotulação e determinação dos objetos-sítios e objetos-ligações

A determinação dos sítios objetos e ligações objetos é obtida a partir dos grupos-sítios e grupos-ligações. Cria-se uma coleção de objetos-sítios e uma coleção de objetos-ligações. Neste módulo, cada sítio ou ligação receberá um rótulo e, através da linha mediana, estabelece-se a conectividade entre esses objetos.

Entrada: coleção linha mediana 2D afinada sem os últimos pixels.

Saída: coleção da linha mediana 2D afinada sem os últimos pixels mais a coleção dos objetos-sítios e objetos-ligações com a informação da conectividade entre seus objetos.

Procedimento: veja-se Figura AI.4.

AI.5- Fluxograma para obtenção da linha-limite

A obtenção da linha-limite da ligação determina a separação das áreas dos sítios e ligações.

Entrada: coleção linha mediana 2D afinada sem últimos pixels mais a coleção dos objetos-ligações e objetos-sítios.

Saída: coleção linha mediana 2D afinada sem últimos pixels mais a coleção dos objetos-ligações e objetos-sítios mais a linha-limite.

Procedimento: veja-se Figura AI.5.

AI.6- Fluxograma para pintura e determinação das áreas de sítios e ligações.

A determinação das áreas dos sítios e ligações é feita enquanto se faz a pintura das ligações e dos sítios.

Entrada: imagem binária mais a coleção dos objetos-ligações e objetos-sítios.

Saída: imagem com os sítios e ligações pintadas e a contribuição em área de cada sítio ou ligação.

Procedimento: veja-se figura AI.6.

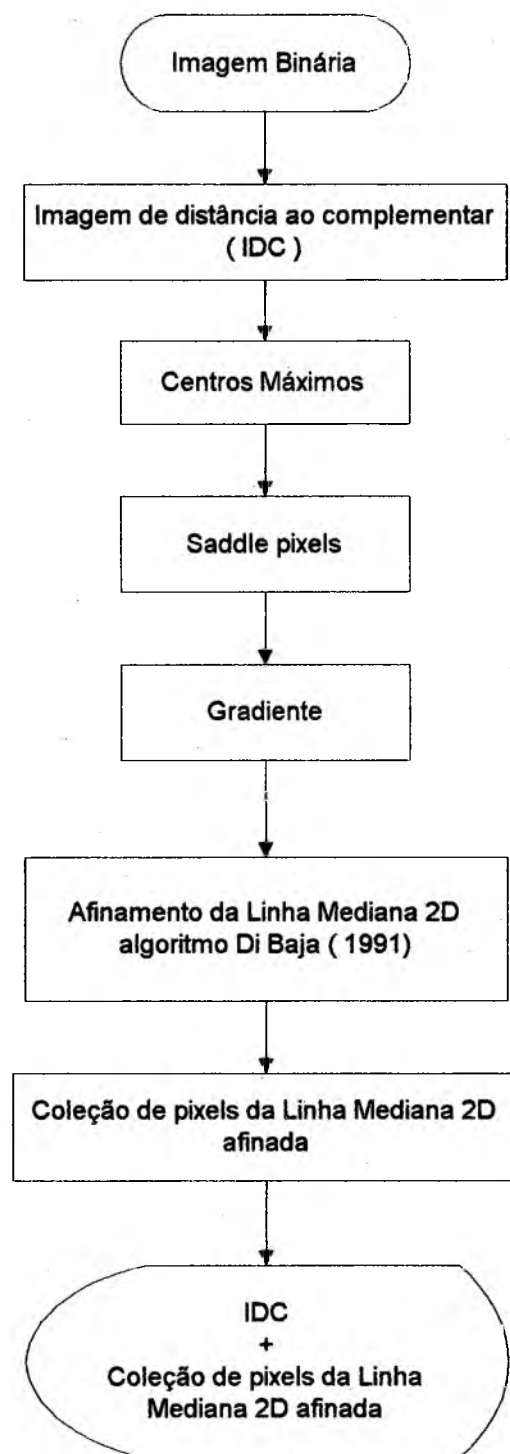


Figura A1.1: Fluxograma para obtenção da linha mediana 2D afinada.

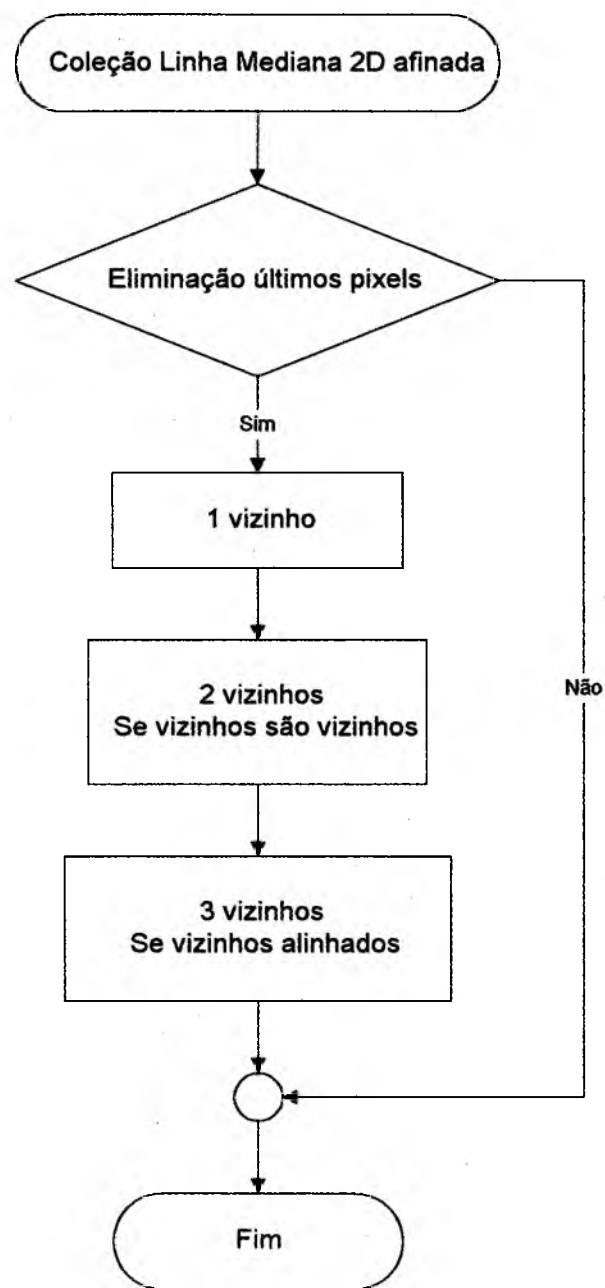


Figura AL2: Fluxograma para eliminação dos últimos pixels.

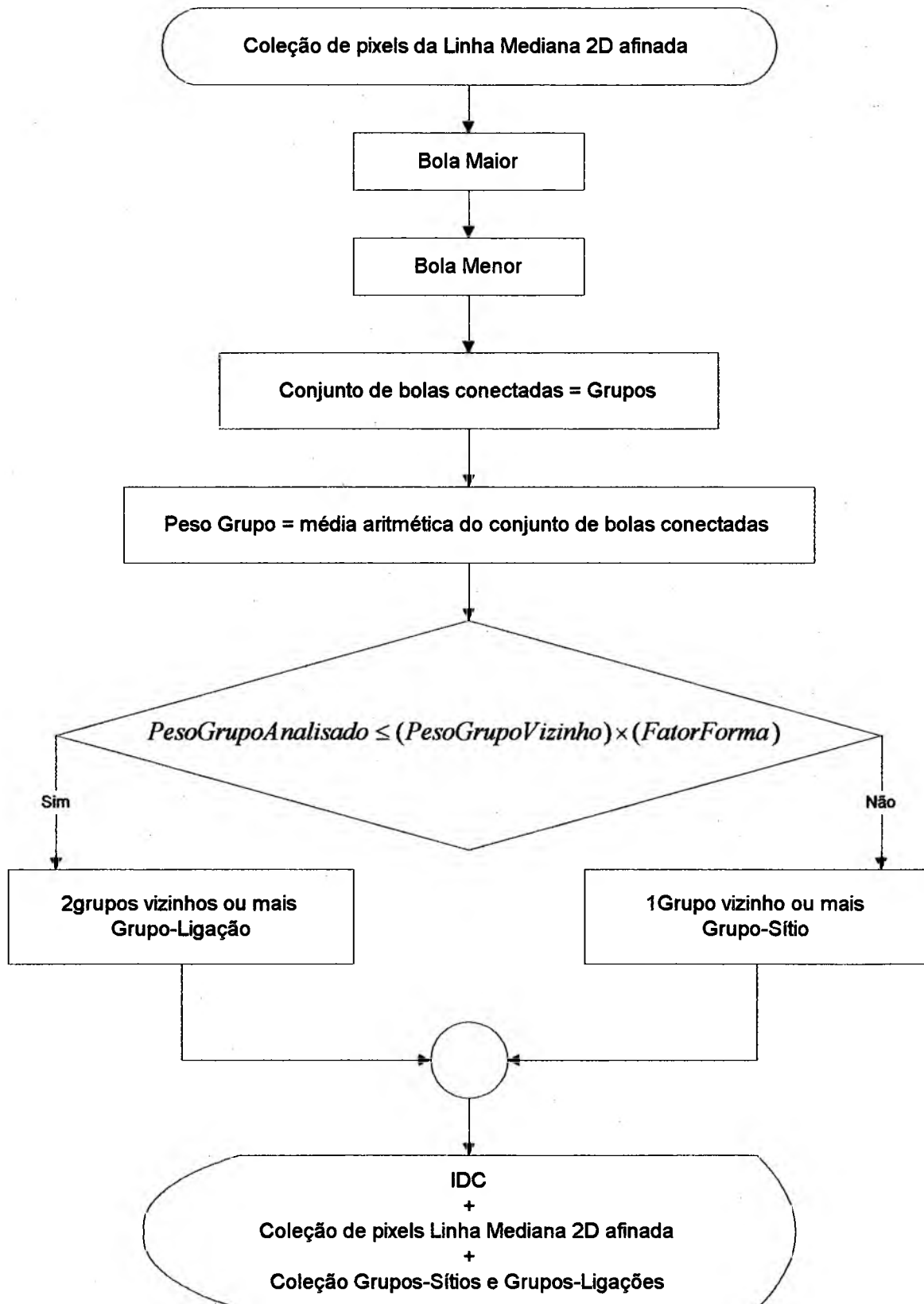


Figura A1.3: Fluxograma para obtenção dos grupos-sítios e grupos-ligações.

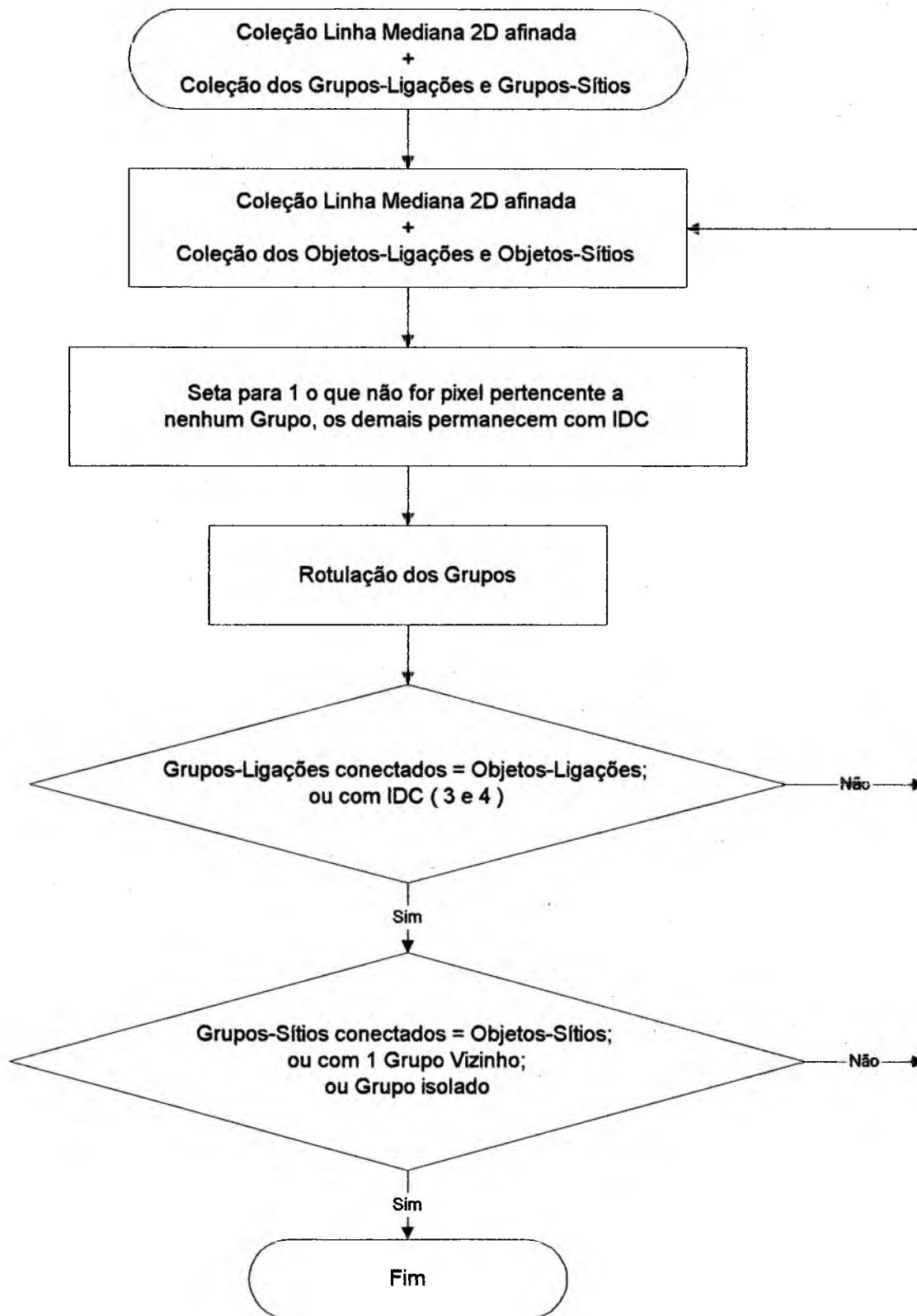
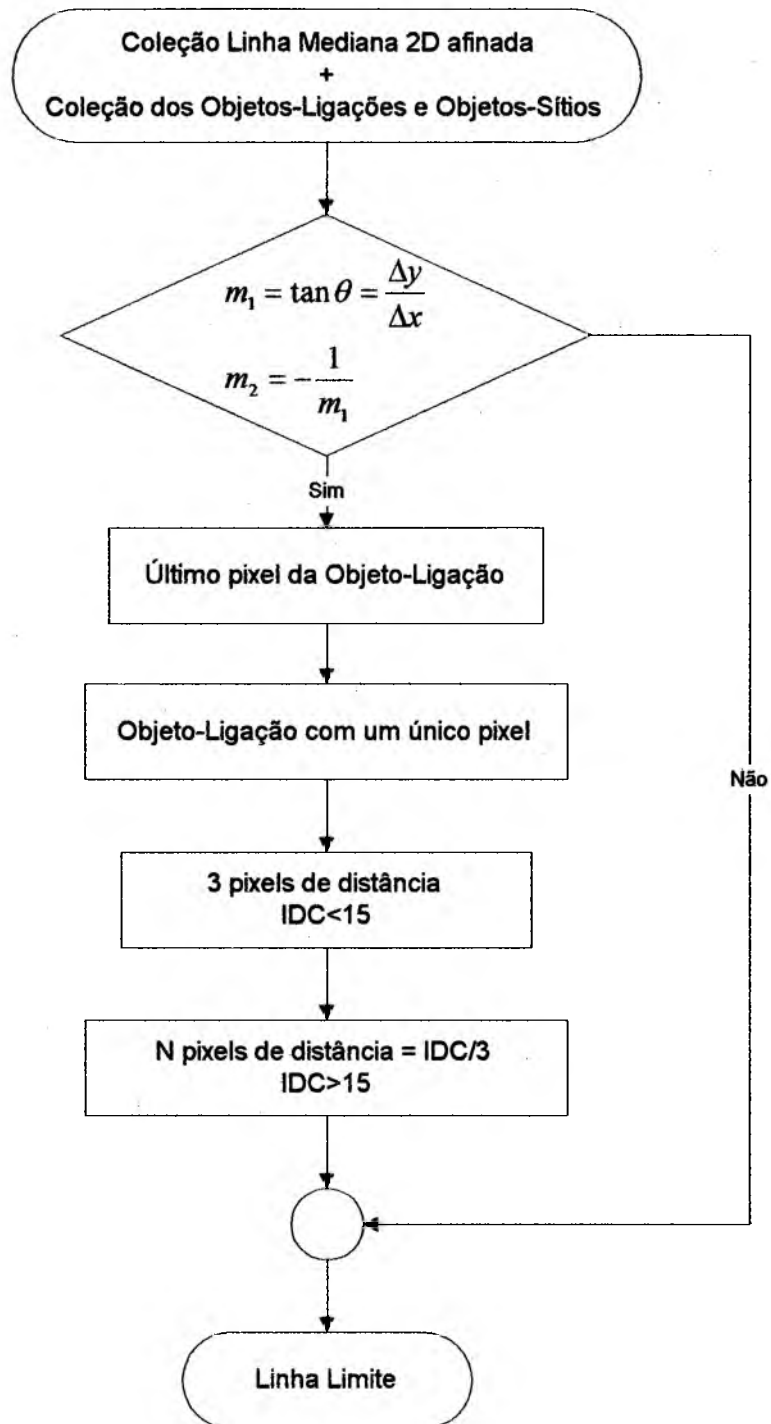


Figura A1.4: Fluxograma de rotulação e determinação dos objetos-sítios e objetos-ligações.

**Figura AL5: Fluxograma obtenção linha-limite.**

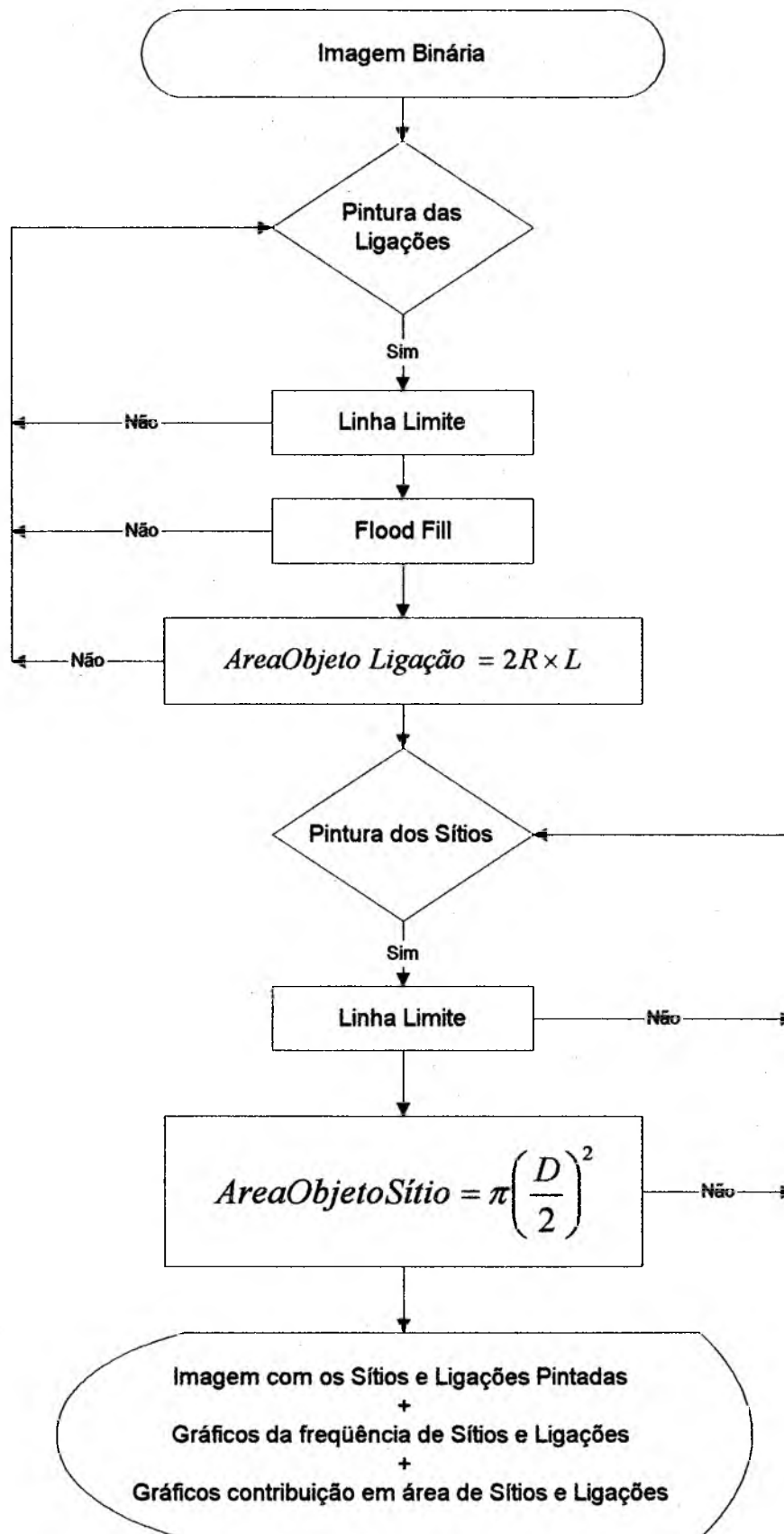


Figura AL6: Fluxograma para pintura e determinação das áreas de sítios e ligações

ANEXO II

FLUXOGRAMA DO PROGRAMA DA LINHA MEDIANA 3D

O programa da linha mediana 3D obtém uma linha contínua e unitária representativa do espaço poroso. A linha mediana 3D mantém a conectividade, isto é, a linha possui informações que podem representar a topologia da estrutura original.

AII.1-Fluxograma para a determinação da linha mediana 3D

O programa de implementação da linha mediana 3D é feito a partir de uma analogia da linha mediana 2D. Neste programa, usa-se um objeto implementado por Zhirong (1997) para o afinamento do plano mediano para a linha mediana 3D.

Entrada: imagem binária reconstruída 3D.

Saída: imagem de distância ao complementar (IDC) mais a coleção de voxels da linha mediana 3D.

Procedimento: veja-se Figura AII.1.

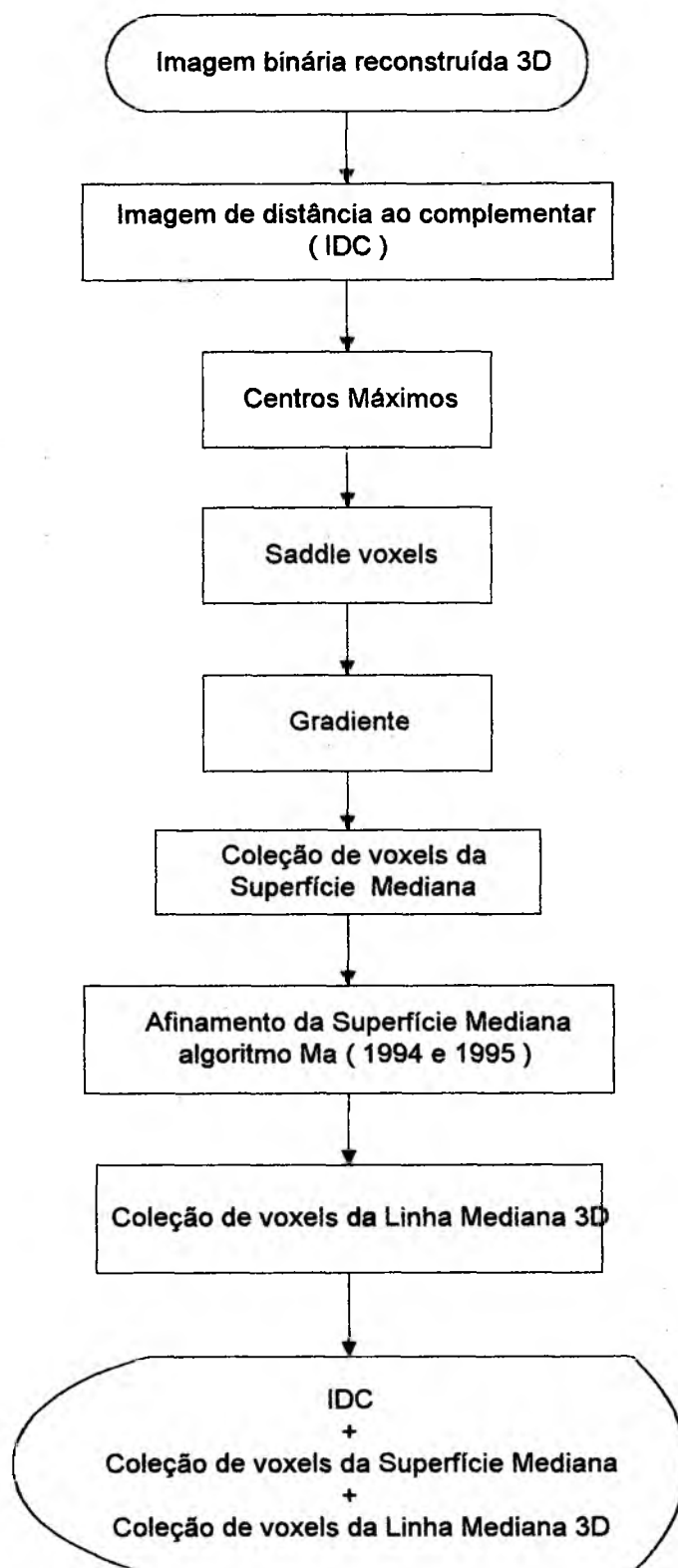


Figura AII.1: Fluxograma para obtenção da linha mediana 3D.